

多材料光电功能光纤研究进展与展望 (特邀)

刘 营, 吴旖豪, 李知博, 毛 杰, 方再金, 杜明辉*, 郭 团*

(暨南大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510632)

摘 要: 作为光传输和光子器件的核心材料, 光纤已广泛应用于光通信、激光器、光传感等领域。随着光纤应用领域的不断扩展, 对光纤的性能和功能提出了更高的要求, 传统的光纤材料已不能满足人们日益增长的需求。在此背景下, 多材料光纤应运而生。多材料光纤是近年来发展起来的一类新型光纤材料, 其旨在将不同功能材料集成到单一光纤, 实现单一光纤的多功能和高性能, 为在多个领域中扩展光纤的应用提供新的机会。特别是光电功能多材料光纤, 因其在先进光电子器件、光遗传学、智能织物、多功能传感以及柔性可穿戴电子等领域的广泛应用而受到越来越多的关注。文中对光电功能多材料光纤的制备方法、结构、性能及应用等进行了总结和归纳, 梳理了光电功能多材料光纤的常用制备技术、设计策略及工作原理。此外, 还总结了光电功能多材料光纤在光电探测、化学探测、超声探测、辐射探测以及光遗传神经调控等领域的研究进展。最后, 对光电功能多材料光纤的发展前景及存在的挑战进行了展望和分析。

关键词: 多材料光纤; 光电功能光纤; 功能集成; 多材料复合; 热拉伸

中图分类号: TN2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250022

引用格式: LIU Ying, WU Yihao, LI Zhibo, et al. Research progress and prospect of multimaterial optoelectronic fibers (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(4): 20250022.

刘营, 吴旖豪, 李知博, 等. 多材料光电功能光纤研究进展与展望 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(4): 20250022.

0 引 言

光纤的发明对人类的日常生活产生了重要影响。作为光传输和光子器件的核心, 光纤已广泛应用于光通信、光计算、光传感等领域^[1-3]。随着光纤应用领域的不断扩展, 人们对光纤的性能和功能提出了更高的要求。如在单一光纤中实现光电的同步传输与调制、在单一光纤中实现从紫外可见到红外波段的光传输、变换与探测等。受限于组分材料和结构的限制, 传统光纤难以实现这些新型功能。在此背景下, 多材料光纤应运而生, 这种融合了光、电、磁、声、热和压电等功能材料的新型光纤极大扩展了传统光纤的应用领域^[4-7]。在过去的二十年里, 这种新型光纤材料得到了快速发展。研究人员已经设计和制备了许多具有不同功能的多材料光纤, 这些新型光纤在光电

探测、能源存储、生物医药、3D 打印、神经调控、纳米科学与制造等领域显示出广泛的应用前景^[8-12]。

多材料光纤通常包含两种或两种以上具有不同物化性能的材料, 研究人员探索了多种技术来制备高性能的多材料光纤。目前, 成功集成了光、电、声、热以及压电等功能材料到单一光纤, 并实现了通信、传感、成像等功能, 且在多材料光纤制备过程中发现了一些新奇的现象, 极大地拓展了传统光纤的应用领域。光纤不仅可以作为一种通讯工具, 尤其是对聚合物光纤, 具有制备温度低、机械性能好、兼容性好、生物相容性好等优点, 复合一些光功能、电功能、磁功能、热电功能等材料后, 可以用来制备智能传感设备、智能织物以及可穿戴电子设备等多功能柔性器件及系统。可以说, 多材料光纤的出现, 不仅赋予光纤新的功能, 还极大扩展了传统光纤的种类和应用。

收稿日期: 2025-01-08; 修订日期: 2025-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62405111, 62035006)

作者简介: 刘营, 男, 博士生, 主要从事多材料光纤方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 郭团, 男, 研究员, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。

通讯作者: 杜明辉, 男, 副教授, 博士, 主要从事多材料光纤方面的研究。

目前,多材料光纤已广泛应用于人们的日常生活。特别是具有光电转换、传输与收集等功能的光电功能多材料光纤,因其在先进光电子器件、光遗传学、智能织物、多功能传感以及柔性可穿戴电子等领域的广泛应用而受到越来越多的关注。基于此,文中拟以多材料光电功能光纤为对象,梳理多材料光纤的制备方法、工作原理、光纤结构、功能及应用,并对多材料光电功能光纤的发展前景进行了展望和分析,以为新型光纤材料的开发提供指导。

1 光电功能多材料光纤制备技术

多材料光纤的制备工艺与传统石英光纤类似,通常包括预制棒制备和光纤热拉制两个步骤。在多材料光纤预制棒制备过程中,预制棒的几何形状和材料组分可以根据预设目标进行定向控制。宏观光纤预制棒的形状可以任意设计,如方形、矩形、椭圆形和圆形等,具有较大灵活性。组成多材料光纤的组分材料可以是金属、半导体、晶体、玻璃、聚合物甚至微型电子元器件如 μLED 等。得到光纤预制棒后,第二步是将宏观光纤预制棒加工成一定长度并且结构均匀的功能光纤,最终光纤的直径可精确控制,并且光纤保持初始预制棒的几何形状和结构。

在过去的几十年里,研究人员开发了很多方法来制造宏观预制棒以及多材料光纤,如管棒法、挤压法、3D打印法、热拉法、薄膜轧制法、堆叠拉制法等。目前,热拉伸技术因其结构可控性、可扩展的制

造能力和优异的相容性等独特优势,被广泛用于制备多功能多材料光纤。在热拉伸过程中,不同功能不同结构的材料如金属、半导体、晶体、聚合物、 μLED 等均可以集成到单根光纤中,以实现单一光纤的多功能集成,最终实现多样化的应用。下面,介绍常用制备预制棒和多材料光纤的方法。

1.1 宏观预制棒制备

宏观预制棒的制备通常是多材料光纤制备的首要步骤。在这一步中,需要将不同功能材料组装到一起,形成一个宏观的光纤预制棒。宏观预制棒的常用制备方法包括:管棒法、挤压法、薄膜轧制法、堆叠拉制法、3D打印法等。

1.1.1 管棒法

管棒法是目前最常用的一种制造宏观光纤预制棒的方法^[13],该方法的特点是可以将粉末、块状材料、薄膜等不同形态的多种功能材料预先加工成棒状,作为纤芯材料;然后将其复合到包层材料中,形成具有芯包结构的光纤预制棒,如图1(a)所示。然后通过真空干燥固化成型,将不同组分材料紧密粘合在一起,形成一个完整的预制棒。最后利用光纤拉丝塔,在一定温度下,将宏观预制棒热拉伸成一定长度并且结构均匀的多材料光纤。通常,管棒法制备的多材料光纤具有相对均匀的截面结构,并且可以通过预先设计预制棒的尺寸和比例来调整最终多材料光纤的结构。此外,这种方法的另一典型优点是宏观预制棒的结构可以定向设计,并且由于其优异的加工特性,适

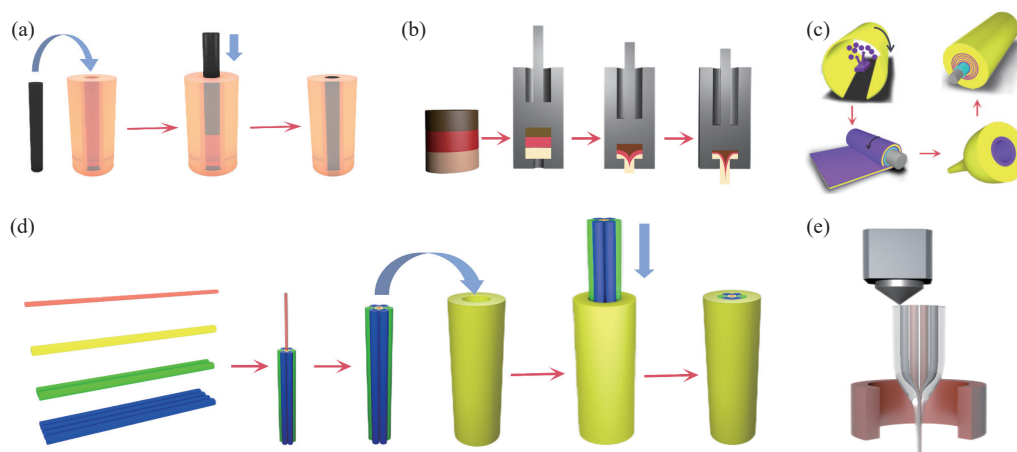


图1 多材料光纤预制棒制备。(a)管棒法;(b)挤压法;(c)薄膜轧制法;(d)堆叠拉制法;(e)3D打印法

Fig.1 Schematic diagram of preparation process of multimaterial preforms. (a) Rod-in-tube method; (b) Extrusion method ; (c) Thin-film rolling method; (d) Stack and drawn method; (e) 3D printing method

用于多种材料组合,特别是热塑性较好的玻璃和分子聚合物材料。

1.1.2 挤压法

挤压法是一种常见的制备宏观光纤预制棒的方法,它通过“在一定压力下将不同材料进行挤压成型”来制备具有复杂结构的多材料光纤^[14]。各组分材料也称之为“坯料”,在热挤压过程中,坯料在套筒中加热至粘性状态,然后通过螺杆或活塞从套筒模具中缓慢挤出,即可得到光纤预制棒,如图 1(b) 所示。预制棒的尺寸由开模口的尺寸所决定。此外,预制棒的截面结构可以通过设计模具的出口结构来定向调整。这种方法的典型特点是其可以同时处理多种材料,适合制备具有复杂结构的多材料光纤预制棒,并且具有较好的灵活性,通过精确控制工艺参数,可以得到不同功能的特种光纤,适应不同的应用需求。此外,挤压法可连续生产,具有效率高、生产成本较低的优势。

1.1.3 薄膜轧制法

薄膜轧制法通常用于制造高分子聚合物光纤预制棒^[15]。该方法首先是将组成光纤的原材料加工成薄膜,然后结合化学气相沉积方法在薄膜上沉积光电功能材料,如半导体材料。最后,这些薄膜被轧制成预制棒,并在真空条件下热固化成型,使各种材料紧密接触,形成一个密实的宏观预制棒,如图 1(c) 所示。这种方法特别适合加工各种聚合物材料,因为它们具有优异的柔韧性和可加工性。此外,该方法在制备光子晶体光 (PCF) 和光子带隙光纤 (PBG) 等微结构光纤方面具有独特的优势。一般来说,光纤组分材料在拉伸过程中的流变行为和伸长率是影响多材料光纤热拉制过程的关键因素。在热拉伸过程中,需要对各组分材料进行充分软化,以减少过大的内应力,这就要求光纤各组分材料之间的热膨胀系数和润湿性必须匹配。

1.1.4 堆叠拉制法

堆叠拉制法常用于制备各种微结构光纤,如光子晶体光纤 (PCFs) 和光子带隙光纤 (PBG)^[16]。一般来说,这种方法可以制备各种具有复杂结构的宏观预制棒,并且可以扩展堆叠的数量。通过合理的堆叠单元组合,可以将不同的材料整合到一根光纤,形成多材料多功能集成光纤,从而极大扩展单一光纤的功能与应用。这一方法对材料的几何形状具有很大的灵活

性,可以由棒、管、和/或板材从单一或多个材料组装成一个光纤预制棒,如图 1(d) 所示,预制棒的结构和尺寸由目标光纤的结构所决定。此外,多个堆栈和光纤的迭代拉丝可以得到所需的尺寸,并可以得到具有复杂横截面结构的多材料光纤。这种方法的缺点是组成多材料光纤的各组分材料需要具有匹配的热学性能,如软化温度和热膨胀系数等。

1.1.5 3D 打印法

3D 打印法是近年来应用于制造多材料光纤预制棒的一项新技术,这种方法可以将多种具有不同功能的材料组装成单一的具有不同结构的宏观预制棒^[17],如图 1(e) 所示。此外,它可以数字化排列纤维的组成材料,以实现各种应用场景的特定功能,如生物医学、微流体领域。3D 打印技术能够同时处理多种材料,适合制备具有复杂材料分布的多材料光纤预制棒。通过精确控制材料的打印路径,可以实现材料在预制棒中的梯度分布或特定结构设计。目前,3D 打印技术能够实现 μm 级甚至 nm 级的打印精度,通过精确控制打印参数(如打印速度、温度、材料比例等),可以实现材料分布的均匀性和界面质量的高精度控制。尽管 3D 打印技术具有较高的精度,但在制备极小尺寸的光纤预制棒时,打印分辨率无法满足要求,需要开发新型打印材料或优化打印算法来提高精度。此外,3D 打印技术具有极高的设计灵活性,能够实现传统方法难以加工的复杂几何结构(如多孔结构、异形截面结构等),为光纤预制棒的功能化设计提供了更多可能性。总体而言,3D 打印是一种增材制造技术,能够根据设计精确添加材料,减少材料浪费,降低生产成本,但高精度的 3D 打印设备价格昂贵,成本较高。

1.2 多材料光纤热拉制

在得到宏观光纤预制棒之后,下一步便是通过光纤拉丝塔,将宏观预制棒热拉伸成一定长度并且结构均匀的多材料光纤。如图 2(a) 所示,宏观预制棒通常被送入一个加热炉,加热至粘性状态。然后,在外力拉伸作用下,将多材料预制棒拉伸成均匀并且长度达几公里或几十公里的光纤。在热拉伸过程中,可以将金属、半导体、晶体、聚合物甚至微型器件等不同功能材料集成到一根光纤中,实现多功能的集成,从而极大扩展光纤的应用领域。热拉伸所得光纤的直径

(D_f) 可以通过合理控制热拉伸的温度 (T_d)、光纤拉丝速度 (V_d)、预制棒给料速度 (V_f) 和预制棒初始直径 (D_p) 来调节, 最终所得多材料光纤的直径可表示为:

$$D_f = D_p \sqrt{V_f/V_d} \quad (1)$$

通过热拉伸过程, 可以制备从宏观尺度到微观尺度的结构和功能复合的目标多材料光纤此外, 多材料光纤能够保持宏观预制棒的几何形状和成分, 使整个光纤制造过程具有高度的可预测性和可控性。

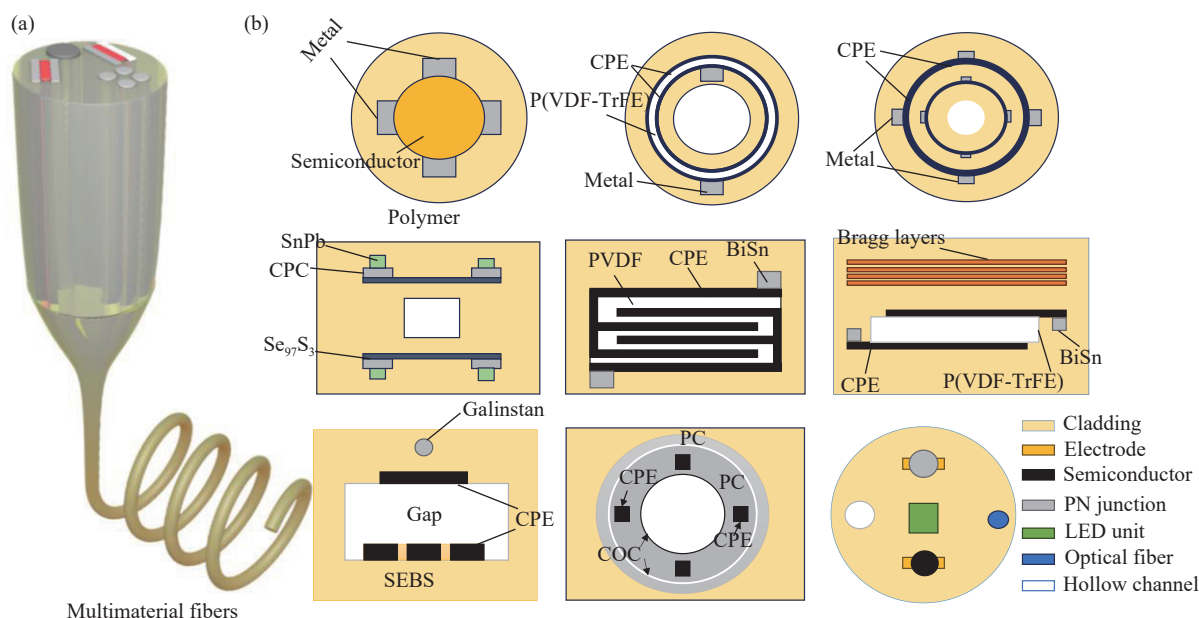


图2 (a) 多材料光纤热拉伸示意图; (b) 基于不同材料与功能组合的多材料光纤端面结构示意图

Fig.2 (a) Schematic diagram of thermal drawing of multimaterial fibers; (b) Multimaterial fiber end structures based on different combinations of materials and functions

总体而言, 多材料热拉伸技术有以下显著特点: 1) 具有较好的灵活性, 多材料预制棒在厘米尺度, 其结构和尺寸可以借助多种先进的加工方法如 3D 打印进行精确设计, 因此所得目标多材料光纤的结构和尺寸可控; 2) 具有很好的兼容性, 不同功能、不同尺度的材料如半导体、金属、二维材料、晶体、玻璃、微型芯片、高分子聚合物等可以借助热拉伸技术复合到单一光纤, 实现多功能的集成; 3) 具有很好的可扩展性, 能批量生产多功能集成光纤。通过一根宏观预制棒可以拉制得到几十甚至上百公里长的多材料光纤, 并保持光纤结构和功能在轴向的一致和连续。

2 光电功能光纤的材料选择与结构设计

多材料光纤是由不同尺度不同功能的材料组成, 材料的选择与结构设计对光纤拉制工艺及最终光纤的性能有重要影响。与传统的光纤相比, 多材料光电

功能光纤包含包层、芯层以及电传输层等, 组分材料包括光、电、磁、声、热和压电等功能材料, 并具有丰富的内部结构, 如图 2(b) 所示。

包层材料是多材料光纤的重要组成部分, 它的主要作用是支撑和保护整个光纤的结构, 将功能材料与外界环境隔离开来。包层材料除了起到保护作用外, 还可以在光电功能多材料光纤中起到绝缘体的作用。传统光纤受传输波长的限制, 通常采用二氧化硅作为包层材料。在多功能光纤体系中, 包层材料的选择从二氧化硅扩展到软玻璃以及其他高分子聚合物, 可以覆盖 2400~400 K 的软化温度, 适合承载不同的功能材料^[4,9]。

光纤包层材料的热稳定性和机械性能会显著影响光纤的整体性能。当工作温度接近或超过包层材料的软化温度时, 包层材料会软化甚至熔化, 导致光纤结构变形。此外, 长期暴露在高温环境, 会导致包

层材料发生氧化、降解等化学反应,降低其机械性能和光学性能。包层材料的软化或变形会导致光场分布变化,增加光传输损耗。包层材料的性能退化会降低光纤的抗拉强度和弯曲性能,影响其长期可靠性。当工作温度低于包层材料的脆化温度时,包层材料会变脆,容易产生裂纹。当包层材料的热收缩与纤芯材料不匹配时,可能导致界面剥离或开裂。长期暴露在低温环境下,包层材料中的微小裂纹容易扩展,导致光纤断裂,进而导致光场泄漏,增加光传输损耗。低温脆化和裂纹扩展会显著降低光纤的机械可靠性。因此,当光纤需要在高温环境下工作时,应选择具有高软化温度、低热膨胀系数和良好的抗氧化性能材料,如氟化物玻璃或高温聚合物。当光纤需要在低温环境下工作时,应选择具有低脆化温度和高韧性的材料,如特殊改性聚合物或复合材料,并尽可能在包层外部增加保护层(如金属涂层或陶瓷涂层),以减轻热应力和机械应力,提高光纤的稳定性可长期可靠性。

纤芯材料是光电功能多材料光纤的重要组成部分,它包含多种具有不同功能、结构与属性的材料,常见的具有电学性能的纤芯材料包括以下几类:

1) 半导体材料: 半导体材料具有其独特优势,如近红外波段透过性、光电效应、拉曼增益系数高、三阶非线性系数大等特点。将半导体材料集成到多材料光纤中,结合半导体材料的光电特性和光纤的波导特性,将具有不同光学、电学和热学性能的材料高度集成一体化,构成多材料光纤,在光学传感、光电器件、拉曼激光、柔性电子等领域具有广阔的应用前景。目前,一般是通过热拉伸工艺和化学气相沉积工艺可以将各种半导体材料如 Si、Ge 及其合金、III-V 化合物半导体 (GaSb、InSb)、II-VI 化合物半导体 (ZnSe) 和硫系化合物 (As-Se、As-S-Te) 等集成到多材料光纤中^[18-29]。以硅、锗为代表的晶体半导体材料具有高热导率、高增益等特性,传输光谱范围从可见光到远红外光,具有其特有的光电响应特性和红外波段透过性。由半导体材料制备而成光电器件可应用于光电探测和光学传感。通过调控纤芯和包层的材料组成和优化设计光纤内部结构,实现光纤在光学、电学、磁学、热学领域的广阔应用。这些半导体材料不仅可以扩展多材料光纤的光传输范围,还极大扩展了多材料光纤在紫外到近红外光探测、霍尔效应器件、光致

发光器件以及非线性光学器件等领域的应用^[30-35]。

2) 电极材料: 电极和电子材料在光电子功能单元中起着传导电信号和向光纤内光电子器件供电的关键作用。固体金属如金、铜、铂、钨等具有高导电性,已被广泛用作多材料光纤的电极^[23,36-40]。这些金属材料具有较高的熔融温度,适用于硅基光电子光纤,也同样适用于低温聚合物光纤。然而,一些金属的粘度和表面张力太小,无法保持光纤结构,会与功能半导体材料混合,从而破坏目标光纤的结构和功能。带有集成导电填料的掺杂聚合物,如金属颗粒和碳纳米管,可以用作低温聚合物包层光电光纤中的电极材料,而且具有很好的可加工性与柔性,因此可以替代金属材料作为电传输介质^[41]。例如,纳米碳纤维聚合物基体被用作神经探针,具有良好的导电性和柔韧性。此外,液态金属也可以封装在柔性聚合物光纤中,从而实现基于电学的传感应用。

当光纤预制棒由单一材料组成时,在拉伸温度下的粘度决定了拉伸的参数,例如拉伸速度。另一方面,多材料预制棒可能包含与热拉伸不相容的材料,例如晶体半导体或金属。因此,使用热拉伸工艺对与这种制造方法兼容的材料组合施加了限制。

为深入了解各种材料组合的可行性,图 3(a) 中给出了硅玻璃、硅和金的粘度随温度变化的函数关系。这些材料代表三种不同的材料类别: 非晶绝缘体、晶体半导体和金属。二氧化硅的软化温度范围较宽,从而提供了广泛的拉伸条件。硅和金的特点是在熔点 T_m 以上粘度突然下降,在那里发生相变。二氧化硅可以用作“包层”,其中硅或金“芯”嵌入在预制棒中。在这种情况下,包层作为支架来容纳和限制低粘度纤芯材料的流动。

从上述例子,可以总结出多材料拉丝的一般约束,即至少有一种材料应该是无定形的,通常是玻璃或聚合物。这种“骨干”材料形成了一个外部包层,在拉伸过程中对其他材料起到支撑作用,并保持纤维的截面结构。选择的芯包非晶材料必须具有重叠的软化温度,而晶体材料的熔点要低于热拉伸温度。拉丝温度要低于纤芯材料的沸腾温度。此外,必须注意避免在材料粘度降低和横向尺寸减小时可能发生的流体不稳定性。材料还必须在延伸到拉伸温度的温度范围内具有相对相似的热膨胀系数,以避免由于热-

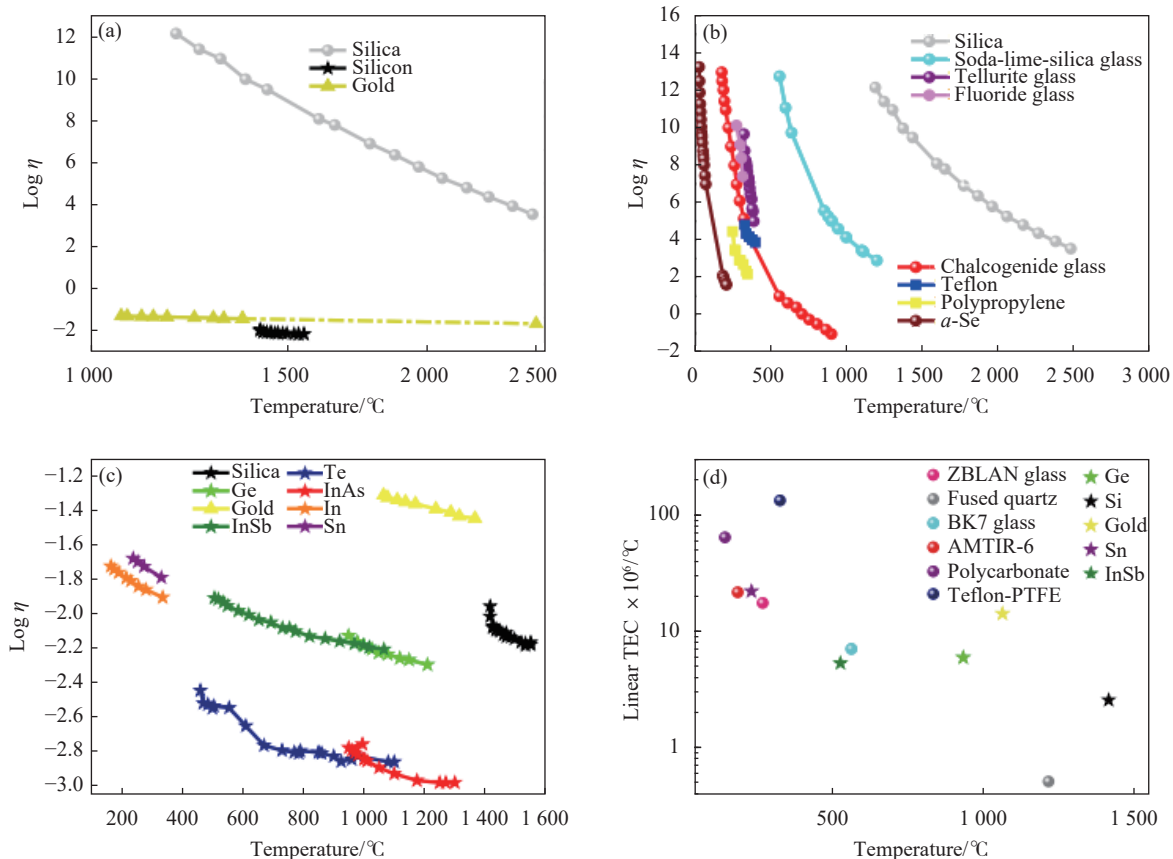


图3 不同种类材料粘度与温度的对应关系^[4]。(a) 二氧化硅、硅、和金的粘度与温度的关系^[42-44];(b) 二氧化硅、钠-钙-硅玻璃、氟化物玻璃、碲酸盐玻璃、硫系玻璃、聚合物和硒的粘度与温度的关系^[45-51];(c) 硅、锗、碲化铟、碲、碲化铟、铟、锡、金的粘度与温度的关系^[52-54];(d) 材料在室温下的线性热膨胀系数(TEC)与金属和半导体的熔化温度(T_m)和非晶材料的玻璃化转变温度(T_g)的关系^[55-58]

Fig.3 Dynamic viscosity of various materials versus temperature^[4]. (a) Viscosity for silica, silicon, and gold^[42-44]; (b) Viscosity for silica, soda-lime-silica glass, fluoride glass, tellurite glass, chalcogenide glass, polymer, and amorphous selenium^[45-51]; (c) The viscosity for silicon, germanium, indium antimonide, tellurium, indium arsenide, indium, tin, and gold^[52-54]; (d) Linear thermal expansion coefficient at room temperature for various materials plotted against the melting temperature (T_m) for metals and semiconductors and the glass transition temperature (T_g) for the amorphous materials^[55-58]

力学不匹配导致的机械断裂。

图3(b)列出了一些典型非晶材料的粘度与温度的关系。一些玻璃(如钠-钙-硅玻璃)具有适合热拉伸的宽温度范围,而其他玻璃(如氟化物,硫属化物和碲化物)具有相对较窄的温度窗口。图3(c)列出了一些典型晶体材料在其 T_m 以上的粘度。结合图3(b)和(c),可以选择潜在的非晶材料对,这些非晶材料可以在预制棒中组合并拉伸成多材料光纤。例如,可以拉制硅、锗或金包覆硅玻璃;InSb包覆钠-钙-硅玻璃;或者用氟化物或硫化物玻璃包裹锡或硒,甚至是聚合物。此外,在图3(d)中列出了典型非晶材料的玻璃化转变温度和晶体材料的熔化温度与线性热膨胀系数

(TEC)的关系。虽然在材料选择中还必须考虑其他因素,但图3为潜在的材料配对提供了基础。根据上述标准选择的两种或两种以上材料可以通过热拉伸集成到单一多材料光纤中,这个特性可用于构建多材料复合的电子或光电纤维及器件,如“光子多材料光纤”和“多材料光电功能光纤”。

3 光电功能多材料光纤的应用

将光电功能材料复合到柔软而细的光纤中,在保留光纤传统导光功能的基础上赋予其电学功能,这对于光纤材料的发展与应用具有十分重要的意义。与传统的硅基电子技术相比,柔性光电子纤维具有可弯

曲、可折叠、可延展、可拉伸的特点,可以很好的与智能织物集成,从而极大扩展了其在可穿戴传感领域的应用。而且,柔性光电子纤维还可以与传统的硅基电子系统进行无缝连接。随着社会逐步向信息化、数字化、智能化方向发展,柔性光电子纤维的应用呈现快速增长的形势。近十几年来,研究者们对此进行了不懈的探索,取得了巨大的进步。目前,已经成功制备了多种柔性光电功能光纤,这些光纤在光探测、化学传感、形变感知、生理传感、光遗传学及可穿戴电子等领域具有广泛的应用。笔者对光电功能多材料光纤的在这些领域的代表性应用进展进行了总结和分析。

3.1 光电探测

通过热拉伸技术,可以将半导体、绝缘体、导体等多种材料集成在一起,并通过精确设计宏观光纤预制棒的结构,可以实现光电功能多材料光纤的大面积、长距离的光传感。2004年麻省理工学院的 FINK 等人首次拉制了金属-半导体-聚合物多材料光电功能光纤,这种光纤具有光电感知功能,如图 4(a) 所示。并且光纤具有良好的柔韧性和机械强度,使得它们可以被编织成织物,用于空间光探测。通过调控纤芯半导体材料的种类、数量和排列方式,可以实现大范围的光场强度和方向的探测。此外,还可以在光纤内部集成布拉格光栅结构,实现窄带光谱探测^[59]。SORIN 等人将非晶半导体、半导体薄膜以及纳米复合材料和金属电极等材料集成到单一光纤,这种光纤具有空间光探测能力^[60]。但这种光纤中的半导体纤芯尺寸较大,电子/空穴对可以很容易的通过材料中的大量陷阱重新结合,从而限制了光纤的光探测能力,可以通过改变光纤的结构和几何形状来改善器件的性能,例如:将半导体芯变成半导体薄膜可显著提高光探测的灵敏度。多个微型光电器件也可集成到单一的光纤以实现多功能。SOEIN 等将多个尺寸小于 100 nm 的光检测元件集成到单根光纤中^[61],这种独特结构的光纤具有很高的可见光分辨率(小于 5 nm)和入射光的角度分辨率(低于 4°)。WEI 等将高熔点的半导体如硅、锗或各种半导体化合物通过热拉伸集成到玻璃光纤中^[62-65],可以获得优异的光电感知功能,极大扩展了光探测的波长范围。目前,已经实现了可响应不同波长的光探测光纤,以及大面积、长距离的光电传感。

3.2 化学探测

有毒有害气体(如 NO、CO、NH₃ 等)对人类健康和生活环境构成严重威胁,因此捕获和检测这些化学物质极为重要。基于光电功能多材料光纤的生化传感器具有高灵敏、快响应的优势,而且光纤制备工艺简单、成本低,可批量制备。STOLYAROV M 等制备了一种中空多材料光纤^[66],其中含有恶胺类化学试剂,该化学试剂在与过氧化氢蒸气反应时会产生绿光,然后通过光纤末端的中空通道进行信号传输及检测,见图 4(b)。在这个光波导的周围是一个光子带隙多层结构,减少了对外部环境的光损耗,该光纤的最低检测浓度可达 100 ppb(1 ppb = 1/1 000 000 000)。中空多材料光纤传感器还可以通过在空腔内填充功能性材料(如分子印迹聚合物、金属有机框架材料 MOFs 等),利用其特异性识别目标分子。例如,分子印迹聚合物可以通过模板分子形成特异性结合位点,实现对目标分子的高选择性识别。另一类是材料特异性吸附,通过选择具有高吸附选择性的材料如石墨

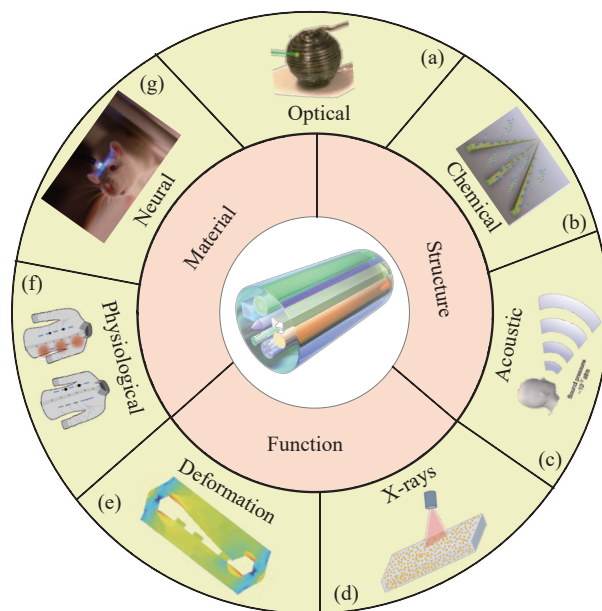


图 4 光电功能多材料光纤在不同领域的应用。(a) 光探测; (b) 化学探测; (c) 声探测; (d) 辐射探测; (e) 形变探测; (f) 生理监测; (g) 神经调控

Fig.4 The applications of multimaterial optoelectronic fibers. (a) Optical detection; (b) Chemical detection; (c) Acoustic detection; (d) Radiation detection; (e) Deformation detection; (f) Physiological monitoring; (g) Neural modulation

烯氧化物等,利用其孔道结构或表面化学性质,实现对目标分子的特异性吸附及检测。通过调节孔道尺寸和表面化学性质,可以提高对目标分子的选择性,或者在光纤表面修饰特异性官能团(如氨基、羧基等),增强对目标分子的吸附能力,同时也可以通过结构设计提高整体选择性。

为了进一步提高光纤的灵敏度,GUMENNIK等人将光探测单元集成在空芯光纤内部,空芯的内表面涂有传感材料,该传感材料可以与流经光纤的过氧化物蒸气发生反应产生荧光信号,信号可被光纤内部的光探测单元捕获^[67]。为了进一步提高检测灵敏度,对拉伸后的纤维进行加热,诱导半导体材料结晶,处理后的纤维检测限达到10 ppb。此外,还可以通过从材料改性和结构优化增强传感器的性能。对于材料改性方面,可以在光纤表面涂覆选择性材料如金属有机框架等,提升对特定目标分子的识别能力,或加入纳米颗粒(如金、银、石墨烯等)增强光学特性,提升灵敏度和选择性。也可以在光纤中掺杂稀土元素或其他功能材料,增强对特定波长光的响应。在结构优化方面,可在光纤内部或表面引入微结构(如光子晶体、布拉格光栅等),提升选择性和抗干扰能力。通过调整空芯光纤的几何参数(如直径、壁厚等),优化光与物质的相互作用,提升灵敏度。通过热拉伸技术,光纤中的光探测结构可以延伸数百米的长度,在远程和分布式传感方面具有广阔的应用前景。为了实现便携式检测,RICHARD等人通过热拉工艺制备了全光纤电化学传感器^[68],其灵敏度与商业丝网印刷电极相当。

3.3 声探测

声传感在日常生活中发挥着重要的作用,如光声成像、超声成像等。光电功能多材料光纤在声波感知上有巨大的潜力,EGUSA等人将铁电聚合物集成到多材料光纤,实现了kHz~MHz的声波感知^[69]。并通过调控光纤的内部结构,例如设计金属-导电聚合物-压电层的蛇形结构,增大了声波感应面积,提高了声探测的灵敏度。WANG等人将压电聚合物聚与金属电极同时集成到单一光纤,研发的柔性声波感知器件实现了2~8 MHz的超声波探测^[70]。

除了探测高频声波信号外,多材料光纤也可以探测极其微弱的声信号。例如YAN等人开发了一种柔

性声传感纤维^[71],它由压电聚合物(P(VDF-TrFE)、P(VDF-TrFE)/BaTiO₃)作为传感单元,通过电极(CPC电极、钢电极)进行信号传输,采用聚合物包层作为绝缘和保护层,如图4(c)所示。这种光纤在kHz~MHz频率范围内具有优异的声发射和传输性能。在此基础上,纤维可以进一步制成大面积的通信收发器织物,不仅可以检测声音的振幅,还可以检测声音传播的方向。这些织物可以用作灵敏的可听麦克风,将机械振动转化为电信号。此外,该纤维还可用于心率和脉搏测量。

3.4 辐射探测

辐射检测在医学诊断、放射治疗、地理勘探、无损检测、高能物理等民用和军用领域有着广泛的应用^[72-74]。近年来,多材料闪烁光纤因其独特的优点被逐渐发展并应用于辐射探测。例如,基于多材料光纤的辐射探测器可以实现实时和远程辐射检测。同时,通过合理设计光纤的结构,可以实现高灵敏的辐射检测。此外,多材料闪烁光纤可以很容易地构建用于可穿戴辐射检测的大面积闪烁织物。DU等人报道了一种多材料光纤辐射探测器^[40],该光纤由半导体芯、金属电极和聚合物包层组成。通过调控光纤内部的流体不稳定性,使纤芯缩成微球颗粒,并且微球颗粒与金属电极连接,从而在光纤内部成功构建阶梯状结构,这种独特的结构可以提供比拉伸光纤更高的检测效率和灵敏度,如图4(d)所示。此外,纤维的高柔韧性使其易于编织成可穿戴辐射检测的织物。近年来,超弹性闪烁纤维和织物也被开发用于辐射检测和X射线成像^[75]。弹性闪烁纤维由苯乙烯-(乙烯共丁烯)-b-苯乙烯(SEBS)和闪烁体材料组成,这种纤维兼具优异的拉伸性和辐射探测性能,具有广泛的应用。

3.5 形变探测

基于多材料光纤的柔性力学传感器在人体运动监测、软机器人以及人造肌肉等多个领域展现出巨大的应用潜力,这些纤维可以检测压力、弯曲、剪切等外部刺激,并将其按一定的规律转化为相应的光信号或电信号。NGUYEN等人设计了一种微机电纤维^[76],通过对纤维结构进行合理设计,可以沿其整个长度高精度地检测和定位外部压力。然而受限于包层材料的刚性结构,其应力传感范围较小,难以实现超低压检测。基于此,SORIN等人对软弹性体的流变特

性如粘度、储存和损失模量等的研究基础上,将液态金属与弹性纤维相结合以实现低形变检测^[77-79]。这种基于弹性体的应力传感纤维具有极大的可拉伸性与可扩展性,可满足多种不同场景的应用需求,例如这些纤维可以放置在机器人手指上,以感知压力并收集有关手指变形的敏感反馈信息。JIA 等人将金属电极集成到弹性纤维中用于压力传感^[80],纤维内的嵌入式电极组成平行线传输线,局部特性阻抗随压力而变化。使用电频域反射计检测沿光纤长度的阻抗变化,可以获得 4 kPa 的高分辨率压力信息。LEBER 等人通过集成多个液态金属纤芯,实现了形变的分布式检测^[81],如图 4(e) 所示。此外,CHEN 等人制备了一种与液态金属结合的可拉伸纤维^[82],该纤维在 1 900% 应变下仍保持优异的导电性。通过与摩擦纳米发电机技术相结合,这些纤维可以作为附着在运动装备上的自供电自适应多维传感器,在承受外界冲击的同时监测运动表现。

3.6 生理监测

半导体是计算、通信和传感器件的基本组成单元,将其集成到纺织级纤维中可使织物具有特定功能。REIN 等人通过热拉工艺,将微型光电芯片集成到纤维中^[83],如图 4(f) 所示。在热拉过程中,芯片与导线的横向间距逐渐减小,最终实现电接触。此外,发光二极管和 p-i-n 光电二极管均已成功整合到光纤中,并且排编织进日常织物,形成可测量心率的光学脉动纺织品传感器。此外,该团队还将硅微型数字芯片与钨丝结合^[84],同时集成到单一纤维,制备了一种可长达数十米的数字光纤。该柔性光纤每米的存储密度约为 7.6×10^5 bit,整根智能芯片纤维中的芯片可单独寻址。当将数字纤维整合到衬衫中时,它可以收集和存储多天的体温数据,并通过经过训练的神经网络实时推断佩戴者的活动,准确度可达 96%。这些工作验证了将不同功能材料如高熔点金属材料和 μ LED 复合到一起的可行性,这使得在纤维和织物中实现复杂的功能成为可能,为多模态生理监测提供了新的机会。

3.7 神经探测

多材料光纤具有体积小、质量轻、传输性能好等优点,在神经传感领域得到了广泛的应用。2009 年,GRADINARU 等人首次将钨电极集成在传统石英光纤

上^[85],用于同时刺激和记录小鼠的神经生理行为,如图 4(g) 所示。随着材料加工技术的进步,聚合物基多材料纤维探针在神经传感领域得到了广泛的应用。2014 年,ANIKEEVA 等人将导电聚合物集成到聚合物波导中,开发了一种全聚合物纤维探针^[86],用于光遗传刺激和神经记录。纤维的高柔韧性使其弯曲刚度比同等直径的传统硅纤维小几个数量级。而探头的阻抗远高于传统金属电极的阻抗。为降低阻抗,研究人员相继将导电银纳米线、碳纳米纤维、石墨烯、金属电极集成到光纤中。此外,ANIKEEVA 等人还研制了多功能集成纤维,具有同步光学刺激、神经记录和药物递送功能。这些光纤是由聚合物、金属和复合材料通过热拉伸而成。PARK 等人制备了多功能纤维探针,纤维探针允许对大脑回路进行长期的光学、电学和化学探测。更重要的是,这些纤维探针可以通过直接传递携带视蛋白基因的病毒载体来实现一步光遗传学,同时提供神经记录和光刺激。为了实现深层组织神经传感,JIANG 等人通过对宏观预制棒的合理设计^[87],得到一种多功能纤维探针,可以实现多通道光刺激、电记录和微流给药功能,开发的柔性多功能探针能够长期记录神经活动并传递光刺激信号,同时可以向小鼠大脑注入化学药物,实现神经元的多模态调控。

4 结论与展望

文中综述了多材料光电功能光纤在多功能传感科学和应用中的研究进展,包括多材料光纤的设计与预制棒及多光纤制备技术,以及多材料光纤在光电探测、生化探测、辐射探测以及光遗传学等领域的研究进展。随着材料加工技术的发展和进步,金属、半导体、晶体、聚合物、玻璃、微型器件、凝胶等多种功能材料可集成到单根光纤或光纤阵列中,实现多功能和高性能,极大地拓展了传统光纤的功能和应用领域。这些多材料光电功能光纤及其衍生材料及器件在未来将更加无缝地进入人们的日常生活,服务于每一个人,甚至改变人类的生活方式。

虽然在过去的二十年中取得了巨大的成功,但多材料光纤的未来发展仍面临一些挑战:

1) 可以集成到光纤中的材料仍然不足。目前最常用的制造多材料光纤的方法仍然是热拉伸法,这种

方法要求所有材料具有匹配的热性能,这限制了材料的选择,以制造多功能纤维。例如,一些与热拉伸不相容的材料,如溶液、二维材料、凝胶材料、晶体等,仍然难以集成到纤维中。需要发展先进的加工技术,将更多的功能材料集成到单一光纤或光纤阵列中,以实现多功能和高性能。例如基于特殊物理场如电场、磁场、声场、光场或多物理场协同等辅助的材料集成技术,通过施加外部场的作用,使材料在外部场的作用下发生定向排列或迁移,从而实现材料的精确分布和界面结合。在制备多材料光纤预制棒时,通过施加电场,可以使不同材料在电场力的作用下实现梯度分布或特定结构排列。在制备掺杂光纤时,电场可以调控掺杂离子的分布,提高掺杂均匀性。电场还可以促进材料界面的电荷转移和化学键形成,从而增强不同材料之间的界面结合强度,减少界面缺陷。在3D打印或拉丝过程中,通过实时调控电场强度和方向,可以实现材料的动态成型,提高制备精度。基于特殊物理场(如电场、磁场、声场、光场)的材料集成技术为多材料光纤的制备提供了新的方向和可能性。这些技术通过引入外部物理场,能够有效调控材料的分布、界面结合和结构成型,从而提升多材料光纤的性能和集成度。未来,随着这些技术的进一步发展和优化,它们将在多材料光纤制备中发挥越来越重要的作用,推动光纤技术的创新和应用。

2) 多材料光纤的功能集成度仍然较低。一般来说,大多纤维只能感知一种物理参数,如温度、应力、光等,而少数纤维可以同时感知两个或两个以上的物理参数。这种限制可能取决于材料成分和多材料纤维的结构配置。如果能够在保证纤维尺寸的前提下,将更多的功能集成到一根纤维中,这可能会为多材料纤维提供更多的机会,如健康监测、脑机接口、智能织物、人工智能等多样化的应用。可能的途径如下:① 在多材料光纤中实现分层集成,将光纤设计为多层结构,每一层实现不同的功能(如光传输、传感、能量传输等),并通过界面优化实现各层之间的高效耦合;② 在多材料光纤中实现模块集成,将光纤设计为多个功能模块的组合,每个模块实现特定的功能(如光调制、传感、信号处理等),并通过光纤内部的波导或微结构实现模块之间的连接;③ 利用光子晶体光纤的特殊结构,通过在光纤中引入周期性微结构,实现光场

调控、传感和能量传输的多功能集成;④ 借鉴微流控技术,在光纤中引入微流道结构,通过流体的流动实现光场调控、化学反应和传感功能的集成;⑤ 在光纤表面或内部涂覆多功能涂层,通过涂层的功能特性实现光传输、传感、能量传输等多功能集成;⑥ 利用智能材料(如形状记忆合金、压电材料、光响应材料)的特性,在光纤中实现动态功能切换和自适应调控。这些方案能够提升多材料光纤的功能集成度和性能,为光纤技术的创新和应用提供新的方向。

3) 多材料光纤的智能化程度仍然较弱。将多材料光纤集成到下一代智能纺织品中,可以促进智能纺织品的智能化进程。例如,将多功能纤维组成的智能织物与人工智能和大数据相结合,将彻底改变人体健康监测,如检测血压、血糖、pH、体温、心率等。同时还可以获得多功能纤维的弯曲、扭转、拉伸、旋转等力学信息。基于上述数据和智能分析,可以随时准确评估人体的健康状况,这将极大地改变人类的日常生活方式。

参考文献:

- [1] PENDAO C, SILVA I. Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications [J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7554.
- [2] XIONG Yifeng, XU Fei. Multifunctional integration on optical fiber tips: challenges and opportunities [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(6): 064001.
- [3] NUMKAM F E, ABOKHAMIS M S, JASION G T, et al. Loss in hollow-core optical fibers: mechanisms, scaling rules, and limits [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2023, 15(1): 1-85.
- [4] TAO Guangming, STOLYAROV A M, ABOURADDY A F. Multimaterial fibers [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2012, 3(4): 349-368.
- [5] DU Minghui, LV Shichao, QIU Jianrong, et al. Multimaterial fibers for multifunctional sensing applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(10): 2301125.
- [6] LOKE G, YAN W, KHUDIYEV T, et al. Recent progress and perspectives of thermally drawn multimaterial fiber electronics [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(1): 1904911.
- [7] YAN Wei, PAGE A, NGUYEN-DANG T, et al. Advanced multimaterial electronic and optoelectronic fibers and textiles [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(1): 1802348.
- [8] FACCINIDE LIMA C, VAN DER ELST L A, KORAGANJIV N,

- et al. Towards digital manufacturing of smart multimaterial fibers [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14: 1-16.
- [9] ZHANG Jing, WANG Zhe, WANG Zhixun, et al. Advanced multi-material optoelectronic fibers: a review [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 39(12): 3836-3845.
- [10] WANG Zhe, CHEN Mengxiao, ZHENG Yu, et al. Advanced thermally drawn multimaterial fibers: structure-enabled functionalities [J]. *Advanced Devices & Instrumentation*, 2021, 2021: 676470.
- [11] ABOURADDY A F, BAYINDIR M, BENOIT G, et al. Towards multimaterial multifunctional fibres that see, hear, sense and communicate [J]. *Nature Materials*, 2007, 6(5): 336-347.
- [12] CHEN Xin, MENG Yan, LAPERROUSAZ S, et al. Thermally drawn multi-material fibers: from fundamental research to industrial applications [J]. *National Science Review*, 2024, 11(10): 290.
- [13] BALLATO J, HAWKINS T, FOY P, et al. Silicon optical fiber [J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 18675-18683.
- [14] GIBSON D J, HARRINGTON J A. Extrusion of hollow waveguide preforms with a one-dimensional photonic bandgap structure [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(8): 3895-3900.
- [15] BAYINDIR M, SORIN F, ABOURADDY A F, et al. Metal-insulator-semiconductor optoelectronic fibres [J]. *Nature*, 2004, 431(7010): 826-829.
- [16] LIAO Meisong, CHAUDHARI C, QIN Guanshi, et al. Fabrication and characterization of a chalcogenide-tellurite composite microstructure fiber with high nonlinearity [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21608-21614.
- [17] LOKE G, YUAN R, REIN M, et al. Structured multimaterial filaments for 3D printing of optoelectronics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4010.
- [18] BALLATO J, HAWKINS T, FOY P, et al. Advancements in semiconductor core optical fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16(6): 399-408.
- [19] WANG Zhe, WEI Lei. Thermally drawn semiconductor fibers: fabrication strategies and applications [J]. *Accounts of Materials Research*, 2024, 5(11): 1366-1376.
- [20] GIBSON U J, WEI Lei, BALATO J. Semiconductor core fibres: materials science in a bottle [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3990.
- [21] HAO Yue. The dawn of ultralong flexible semiconductor fibers [J]. *The Innovation*, 2024, 5(3): 100613.
- [22] YAN Wei, NGUYEN-DANG T, CAYRON C, et al. Microstructure tailoring of selenium-core multimaterial optoelectronic fibers [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1388-1397.
- [23] JI Xiaoyu, LEI Shiming, YU Shih-Ying, et al. Single-crystal silicon optical fiber by direct laser crystallization [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(1): 85-92.
- [24] JI Xiaoyu, PAGE R L, CHAUDHURI S, et al. Optoelectronic fibers: single-crystal germanium core optoelectronic fibers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(1): 1600592.
- [25] GUMENNIK A, LEVY E C, GRENA B, et al. Confined in-fiber solidification and structural control of silicon and silicon-germanium microparticles [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(28): 7240-7245.
- [26] COUCHERON D A, FOKINE M, PATIL N, et al. Laser recrystallization and inscription of compositional microstructures in crystalline SiGe-core fibres [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 13265.
- [27] ZHAO Ziwen, MAO Yujizhe, REN Li, et al. CO₂ laser annealing of Ge core optical fibers with different laser power [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(3): 1333-1347.
- [28] CHAUDHURI S, SPAKS J R, JI Xiaoyu, et al. Crystalline silicon optical fibers with low optical loss [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(3): 378-384.
- [29] SONG S, LØNSETHAGEN K, LAURELL F, et al. Laser restructuring and photoluminescence of glass-clad GaSb/Si-core optical fibres [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1790.
- [30] SONG S, HEALY N, SVENDSEN S K, et al. Crystalline GaSb-core optical fibers with room-temperature photoluminescence [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(6): 1435-1440.
- [31] BALLATO J, HAWKINS T, FOY P, et al. Binary III-V semiconductor core optical fiber [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4972-4979.
- [32] ORF N D, SHAPIRA O, SPRIN F, et al. Fiber draw synthesis [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(12): 4743-4747.
- [33] HOU Chong, JIA Xiaoting, WEI Lei, et al. Direct atomic-level observation and chemical analysis of ZnSe synthesized by in situ high-throughput reactive fiber drawing [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(3): 975-979.
- [34] SAZIO P J A, SPARKS J R, HE Rongrui, et al. Templated growth of II-VI semiconductor optical fiber devices and steps towards infrared fiber lasers [C]//Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices, SPIE, 2015, 9342: 45-52.
- [35] WEI Lei, HOU Chong, LEVY E, et al. Optoelectronic fibers via selective amplification of in-fiber capillary instabilities [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29: 1603033.

- [36] GUO Y, JIANG S, GRENA B J B, et al. Polymer composite with carbon nanofibers aligned during thermal drawing as a microelectrode for chronic neural interfaces [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(7): 6574-6585.
- [37] DU Minghui, HUANG Lu, ZHENG Jiajun, et al. Flexible fiber probe for efficient neural stimulation and detection [J]. *Advanced Science*, 2020, 7(15): 2001410.
- [38] DU Minghui, ZHENG Jiajun, HUANG Yicong, et al. Closed-loop optogenetic modulation of neural activities in freely moving mice with multimodal fibers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(9): 2302044.
- [39] DAI Yi, DU Minghui, HUANG Lu, et al. Multimaterial glass fiber probe for deep neural stimulation and detection [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(2): 2202184.
- [40] DU Minghui, DAI Yi, WANG Zhen, et al. Multimaterial fiber detector for real-time and remote X-ray monitoring [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(7): 2000302.
- [41] CANALES A, JIA Xiaoting, FRORIEP U P, et al. Multifunctional fibers for simultaneous optical, electrical and chemical interrogation of neural circuits in vivo [J]. *Nature Biotechnology*, 2015, 33(3): 277-284.
- [42] URBAN G, BOTTINGA Y, RICHET P. Viscosity of liquid silica, silicates and aluminosilicates [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1982, 46: 1061-1072.
- [43] KAKIMOTO K, EGUCHI M, WATANABE H, et al. Natural and forced convection of molten silicon during czochralski single crystal growth [J]. *J Cryst Growth*, 1989, 94(2): 412-420.
- [44] OFTE D. The viscosities of liquid uranium, gold and lead [J]. *J Nucl Mater*, 1967, 22(1): 28-32.
- [45] NAPOLITANO A, HAWKINS E G. Viscosity of a standard soda-limesilica glass [J]. *J Res Nat Bur Stand Sec A: Phys Ch*, 1964, 68(5): 439-448.
- [46] BRAGLIA M, Bruschi C, Cavalli D, et al. Rheology of fluoride glasses [J]. *J Crystal Solid*, 1997, 213-214(12): 325-329.
- [47] BELWALKAR A, MISIOLEK W Z, TOULOUSE J. Viscosity study of the optical tellurite glass: 75TeO₂-20ZnO-5Na₂O [J]. *J Non-Cryst Solid*, 2010, 356(1): 1354-1358.
- [48] TVERJANOVICH A S. Temperature dependence of the viscosity of chalcogenide glass-forming melts [J]. *Glass Phys Chem*, 2003, 29(6): 532-536.
- [49] CHU B, LINLIU K. Viscosity characterization of poly(tetrafluoroethylene) by centrifuge ball viscosimetry [J]. *Macromolecules*, 1995, 28(8): 2723-2727.
- [50] COLLINS B, SHIELDS J, BUTLER K, et al. Exploring the role of polymer melt viscosity in melt flow and flammability behavior [R]. National Inst of Standards and Technology (BFR), Gaithersburg, MD, 2000: 105069.
- [51] KOS TA'L P, MA'LEK J. Viscosity of selenium melt [J]. *J Non Cryst Solids*, 2010, 356(50-51): 2803-2806.
- [52] GLAZOV V M, CHIZHEVSKAYA S N, GLAGOLEVA N N. Liquid Semiconductors [M]. New York: Plenum Press, 1969.
- [53] SATO Y, NISHIZUKA T, TAKAMIZAWA T, et al. Viscosity of molten GaSb and InSb [J]. *Int J Thermophys*, 2002, 23: 235-243.
- [54] CULPIN M F. The viscosity of liquid indium and liquid tin [J]. *Proc Phys Soc B*, 1957, 70(11): 1069-1078.
- [55] DARGYS A, KUNDROTAS J. Handbook on Physical Properties of Ge, Si, GaAs and InP [M]. Vilnius: The Science and Encyclopaedia Publishing Centre, 1994.
- [56] ASM Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials [M]. US: ASM International, 1990: 704-705.
- [57] NIX F C, MACNAIR D. The thermal expansion of pure metals: copper, gold, aluminum, nickel, and iron [J]. *Phys Rev*, 1941, 60: 597-605.
- [58] GIBBONS D F. Thermal expansion of some crystals with the diamond structure [J]. *Phys Rev*, 1958, 112: 136-140.
- [59] ABOURADDY A F, SHAPIR O, BAYINDIR M, et al. Large-scale optical-field measurements with geometric fibre constructs [J]. *Nature Materials*, 2006, 5(7): 532-536.
- [60] SORIN F, LESTOQUOY G, DANTO S, et al. Resolving optical illumination distributions along an axially symmetric photodetecting fiber [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 24264-24275.
- [61] SORIN F, SHAOIRA O, ABOURADDY A F, et al. Exploiting collective effects of multiple optoelectronic devices integrated in a single fiber [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(7): 2630-2635.
- [62] WANG Zhixun, WANG Zhe, LI Dong, et al. High-quality semiconductor fibres via mechanical design [J]. *Nature*, 2024, 626(7997): 72-78.
- [63] ZHANG Jing, WANG Zhe, WANG Zhixun, et al. In-fibre particle manipulation and device assembly via laser induced thermocapillary convection [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5206.
- [64] ZHANG Ting, WANG Zhe, SRINIVASAN B, et al. Ultraflexible glassy semiconductor fibers for thermal sensing and positioning [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 11(2): 2441-2447.
- [65] ZHANG Ting, LI Kaiwei, ZHANG Jing, et al. High-performance, flexible, and ultralong crystalline thermoelectric

- fibers [J]. *Nano Energy*, 2017, 41: 35-42.
- [66] STOLYAROV A M, GUMENNIK A, MCDANIEL W, et al. Enhanced chemiluminescent detection scheme for trace vapor sensing in pneumatically-tuned hollow core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12407-12415.
- [67] GUMENNIK A, STOLYAROV A M, SCHELL B R, et al. All-in-fiber chemical sensing [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(45): 6005-6009.
- [68] RICHARD I, SCHYRR B, AIASSA S, et al. All-in-fiber electrochemical sensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(36): 43356-43363.
- [69] EGUSA S, WANG Z, CHOCAT N, et al. Multimaterial piezoelectric fibres [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(8): 643-648.
- [70] WANG Shun, ZHANG Ting, LI Kaiwei, et al. Flexible piezoelectric fibers for acoustic sensing and positioning [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2017, 3(3): 1600449.
- [71] YAN Wei, NOEL G, LOKE G, et al. Single fibre enables acoustic fabrics via nanometre-scale vibrations [J]. *Nature*, 2022, 603(7902): 616-623.
- [72] DAVERY C J, ARGYROS A, FLEMING S C, et al. Multimodal optogenetic neural interfacing device fabricated by scalable optical fiber drawing technique [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34): 10068-10072.
- [73] GARWOOD I C, MAJOR A J, ANTONINI M J, et al. Multifunctional fibers enable modulation of cortical and deep brain activity during cognitive behavior in macaques [J]. *Science Advances*, 2023, 9(40): 0974.
- [74] PARK S, GUO Yuanyuan, JIA Xiaoting, et al. One-step optogenetics with multifunctional flexible polymer fibers [J]. *Nature Neuroscience*, 2017, 20(4): 612-619.
- [75] DU Minghui, WANG Jin, XU Sijia, et al. Super-elastic scintillating fibers and fabrics for efficient and visual radiation detection [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(4): 1493-1504.
- [76] NGUYEN-DANG T, PAGE A G, QU Yunpeng, et al. Multimaterial micro-electromechanical fibers with bendable functional domains [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(14): 144001.
- [77] QU Yunpeng, NGUYEN-DANG T, PAGE A G, et al. Superelastic multimaterial electronic and photonic fibers and devices via thermal drawing [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(27): 1707251.
- [78] XIAN Shuai, XU Yong, LI Yixin, et al. Flexible triboelectric sensor based on catalyst-diffusion self-encapsulated conductive liquid-metal-silicone ink for somatosensory soft robotic system [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 35(2): 2412293.
- [79] DONG Chaoqun, LEBER A, DAS GUPTA T, et al. High-efficiency super-elastic liquid metal based triboelectric fibers and textiles [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3537.
- [80] ZHANG Yujing, LI Xixuan, KIM J, et al. Thermally drawn stretchable electrical and optical fiber sensors for multimodal extreme deformation sensing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(6): 2001815.
- [81] LEBER A, DONG Chaoqun, CHANDRAN R, et al. Soft and stretchable liquid metal transmission lines as distributed probes of multimodal deformations [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(6): 316-326.
- [82] CHEN M, WANG Z, ZHANG Q, et al. Self-powered multifunctional sensing based on super-elastic fibers by soluble-core thermal drawing [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1416.
- [83] REIN M, FAVROD V D, HOU Chong, et al. Diode fibres for fabric-based optical communications [J]. *Nature*, 2018, 560(7717): 214-218.
- [84] LOKE G, KHUDIYEV T, WANG B, et al. Digital electronics in fibres enable fabric-based machine-learning inference [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3317.
- [85] GRADINARU V, MOGRI M, THOMPSON K R, et al. Optical deconstruction of parkinsonian neural circuitry [J]. *Science*, 2009, 324(5925): 354-359.
- [86] LU Chi, FRORIEP U P, KOPPES R A, et al. Polymer fiber probes enable optical control of spinal cord and muscle function in vivo [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(42): 6594-6600.
- [87] PARK S, YUK H, ZHAO Ruike, et al. Adaptive and multifunctional hydrogel hybrid probes for long-term sensing and modulation of neural activity [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3435.

Research progress and prospect of multimaterial optoelectronic fibers (*invited*)

LIU Ying, WU Yihao, LI Zhibo, MAO Jie, FANG Zaijin, DU Minghui*, GUO Tuan*

(College of Physics and Optoelectronics Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract:

Significance Optical fiber is the cornerstone of information technology and the foundation for the development of a future intelligent society. As the core material of optical transmission and photonic devices, optical fiber has been widely used in optical communication, laser, optical sensing and other fields. With the continuous expansion of the application field of optical fiber, higher requirements are put forward for the performance and function of optical fiber, and traditional optical fiber materials cannot meet the increasing needs of people. Under this background, multimaterial fibers came into being. Multimaterial fiber is a new type of fiber material developed in recent years, which aims to integrate different functional materials into a single fiber to achieve the multifunction and high-performance of a single fiber, providing new opportunities for expanding the application of conventional optical fibers in many fields. In particular, multimaterial fibers, which have the functions of photoelectric conversion, transmission and collection, have attracted more and more attention due to their wide applications in advanced optoelectronic devices, optogenetics, smart fabrics, multifunctional sensing and flexible wearable electronics.

Progress First, the preparation method, structure, properties and application of multimaterial optoelectronic functional fibers are reviewed, and the common preparation method, design strategy and working principle of multimaterial fibers are introduced. Then, the latest progress of multimaterial fiber in the fields of photoelectric detection, biochemical sensing, intelligent fabric and photogenetic neural regulation is summarized. Finally, the development prospect and existing challenges of multimaterial fibers are prospected and analyzed.

Conclusions and Prospects In this paper, the recent progress of multimaterial fibers in multifunctional sensing applications is reviewed, including the design strategies and the fabrication methods, as well as the research progress. With the development and progress of material processing technology, a variety of functional materials such as metals, semiconductors, crystals, polymers, glass, micro devices, and gels can be integrated into a single fiber or fiber array to achieve multifunction and high-performance, which greatly expands the function and application of traditional optical fibers. While great success has been achieved over the past two decades, the future development of multimaterial fibers still faces several challenges: One is that there is still not enough material that can be integrated into the fiber. The most commonly used method for manufacturing multimaterial fibers is still the thermal drawing, which requires all materials to have matching thermal properties, which limits the choice of materials to make multifunctional fibers. Second, the functional integration of multimaterial fiber is still low. In general, most fibers can only sense one physical parameter, while a few fibers can sense two or more physical parameters at the same time. This limitation may depend on the material composition and the structural configuration of the multi-material fibers. Third, the intelligence of multimaterial fiber is still weak. The integration of multimaterial fiber into the next generation of smart textiles can promote the intelligent process of smart textiles. For example, combining smart fabrics composed of multifunctional fibers with artificial

intelligence and big data will revolutionize human health monitoring, such as detecting blood pressure, blood sugar, pH, body temperature, heart rate, etc. At the same time, the mechanical information such as bending, torsion, stretching and rotation of multifunctional fibers can be obtained. Based on the above data and intelligent analysis, the health status of the human body can be accurately assessed at any time, which will greatly change the way people live their daily lives.

Key words: multimaterial fiber; optoelectronic fiber; multifunction integration; multimaterial integration; thermal drawing

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62405111, 62035006)