

# 激光与光电子学进展

## 增材制造在特种石英光纤制备中应用的研究进展

楚玉石<sup>1,2</sup>, 张建中<sup>1\*</sup>, 彭纲定<sup>3</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工程大学物理与光电工程学院纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup>哈尔滨工程大学烟台研究院先进光纤传感技术研发中心, 山东 烟台 264006;

<sup>3</sup>新南威尔士大学电气工程与电信学院, 悉尼 NSW 2052

**摘要** 光纤构成了当今世界通讯的主干网络,已成为人类活动的底层构架。近年来,物联网万物互联对光纤传输带宽的需求急剧增加,光纤功能更是从单一的信息传输扩展到了信息传输和感知一体化,特种石英光纤是实现该目标的一个重要组成部分,其研发成为了热点。特种光纤的复杂结构和多组分掺杂给其高效制造提出了挑战。本文围绕增材制造技术在特种石英光纤高效制备方面的难题、探索及进展进行总结梳理,首先重点报告在基于紫外光固化的增材制造技术路线下,如何克服大尺寸石英增材制造中陶瓷化和塌缩的难题,发展适合的增材技术用于制备特种石英光纤预制棒,以拉制出所需的特种光纤。然后介绍直接墨水书写与选择性激光熔融等不同增材技术用于石英光纤预制棒制造的近期进展。最后对增材制造在石英光纤制造中存在的问题和未来发展趋势进行简要讨论与展望。

**关键词** 光纤光学; 增材制造; 光纤预制棒制造; 特种光纤; 有源光纤

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516003

### Research Progress in Application of Additive Manufacturing in Special Silica Optical Fibers Fabrication

Chu Yushi<sup>1,2</sup>, Zhang Jianzhong<sup>1\*</sup>, Peng Gang-Ding<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics of Ministry of Education, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

<sup>2</sup>Fiber Optical Sensing Center for Excellence, Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264006, Shandong, China;

<sup>3</sup>School of Electrical Engineering and Telecommunications, The University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia

**Abstract** Optical fiber constitutes the backbone network of communication in today's world, and has become the underlying framework of human activities. In recent years, the demand for optical fiber transmission bandwidth for the internet of things has increased dramatically, and the function of optical fiber has expanded from a single information transmission to the integration of information transmission and perception. Special silica optical fiber is an important part of achieving this goal. Its research and development have become hot spot. The complex structure and multi-component of specialty fibers pose challenges for their efficient fabrication. This paper summarizes the difficulties, exploration and progress of additive manufacturing technology in the efficient preparation of special silica optical fibers. First, it focuses on how to overcome the ceramicization and collapse of large-scale silica additive manufacturing under the additive manufacturing technology route based on UV curing, and develop suitable additive technology for the preparation of special silica fiber preforms, so that the required special fibers can be drawn. Then, the recent progress in the fabrication of silica fiber preforms using different additive technologies such as direct ink writing and selective laser melting is introduced. Finally, the existing problems and future development trends of additive manufacturing in the manufacture of silica optical fibers are briefly discussed and prospected.

**Key words** fiber optics; additive manufacturing; optical fiber preform fabrication; specialty optical fiber; active fiber

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-05-17; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62105078)、山东省自然科学基金青年基金(ZR2021QF009)、中央高校基本科研业务费专项基金(3072021CFT2511)

通信作者: \*zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn

## 1 引言

光纤是光导纤维的简称,通常由中央纤芯及绕其的包层组成,利用纤芯和包层的折射率差形成波导结构,并以全反射原理对光进行长距离传输。目前,低损耗的石英光纤和掺铒光纤放大器(EDFA)构成了当今世界网络通信的基础。1966年,Kao等<sup>[1]</sup>从理论上分析验证了用光纤作为传输媒体实现光通信的可能性,并指出可以通过对石英材料的提纯降低其损耗,当损耗低于 20 dB/km 时,光纤就具备了实用价值。1970年,第一根低损耗光纤被美国康宁公司制造,该光纤在 632.8 nm 处的损耗为 20 dB/km<sup>[2]</sup>。1974 年低损耗光纤制作法——化学气相沉积法(CVD)使光纤的传输损耗降低到 1.1 dB/km<sup>[3]</sup>。20 世纪 70 年代末,单模石英光纤的损耗在 1550 nm 处已经下降到 0.2 dB/km<sup>[4]</sup>,配合 20 世纪 80 年代发明的 EDFA 可实现跨洋超长距离信息传输<sup>[5-6]</sup>。

传统的光纤制造技术大多基于 CVD 实现,包括改进的化学气相沉积法(MCVD)、等离子体化学气相沉积法(PCVD)<sup>[7]</sup>、管外气相沉积法(OVD)<sup>[8]</sup>和轴向气相沉积法(VAD)<sup>[9]</sup>。目前,单模光纤的大规模生产均是基于 PCVD/OVD、VAD/OVD 或 OVD/OVD 等复合工艺的预制棒制造技术,MCVD 主要用于有源光纤或光敏光纤等特种光纤的制作。物联网的提出使光纤从单一的信息传递介质逐步扩展为集成信息传递、传感以及测量等一体的多功能器件,因此,需要开发具有复杂结构和多组分掺杂的新型特种光纤,使传统光纤制造方法在特种光纤制造中遇到了挑战。堆拉法(Stack and draw)和熔芯法(MIT)常被用于微结构光纤和多组分光纤的制造。堆拉法在光子晶体光纤(PCF)制造上取得了巨大成功<sup>[10-12]</sup>。该方法先将玻璃管制成直径相同的毛细管,并将毛细管堆积成 PCF 结构,然后将堆积好的毛细管放入一个石英管中进行拉丝。堆积法的优势在于在堆积过程中可以灵活替换某些毛细管,形成不同的微结构,但同时也会面临繁琐的手工劳动。MIT 通过单独制备包层套管和纤芯棒,然后将纤芯棒插入包层套管中在高温下拉制成为光纤,并在光纤拉丝过程中使包层材料处于软化状态而纤芯材料处于融化状态<sup>[13]</sup>。但 MIT 方法在制造多芯光纤时会面临纤芯定位精度低等问题,因此,开发新型的特种光纤制造技术,实现高效精准的复杂结构和组分掺杂,也是光纤制造领域中的重要研究方向。

增材制造技术又被称为三维(3D)打印技术,是快速成型技术的一种,通常以数字模型为基础,通过逐层叠加方式构造三维物体。根据材料的性质可将增材制造技术分为基于固态材料和基于液态材料的增材制造技术。基于固态材料的增材制造技术将粉末和长丝分别通过选择性激光烧结(SLS)/选择性激光熔化(SLM)和熔融沉积成型(FDM)/注塑成型(IM)制造

三维物体。基于液体材料的增材制造技术主要将油墨或光敏树脂通过凝胶化和光聚合完成制造。其中,凝胶化可通过直接墨水书写(DIW)实现,光聚合可通过立体光刻(SLA)、数字光处理(DLP)、双光子聚合(TPP)以及计算机轴向光刻(CAL)实现。增材制造技术具有极高的制造自由度、制造精度以及原材料利用效率<sup>[14]</sup>,满足特种光纤的制造需求。

光纤领域最早利用增材制造技术是塑料光纤,2015年,悉尼大学的 Cook 等<sup>[15-16]</sup>首次利用 FDM 技术制造了塑料光纤预制棒并拉制成光纤。相比于塑料光纤,石英光纤由于石英的高熔点和黏度,难以利用 FDM 增材制造技术。2019年,本课题组展示了基于增材制造预制棒的石英单模光纤<sup>[17]</sup>,随后将该工作延伸至七芯铋钨共掺杂石英光纤<sup>[18]</sup>,解决了 DLP 增材制造技术应用中大尺寸石英材料增材制造过程中产生的陶瓷化或塌缩等问题。2019年和2020年,南安普顿大学的 Camacho-Rosales 等<sup>[19-21]</sup>分别利用 SLS 和 DIW 方式实现了石英光纤预制棒的增材制造,展示了增材制造在光纤制造方面广泛的应用前景。本文在简要介绍石英玻璃增材制造的基础上,着重介绍了石英光纤增材制造的方式,并对其研究进展及未来发展方向进行了分析与展望。

## 2 石英玻璃的增材制造技术

石英玻璃增材制造技术最早通过熔融挤出方式进行塑形。2015年,麻省理工大学的 Klein 等<sup>[22]</sup>开发了应用于石英玻璃的 FDM 系统,通过熔融挤出方式实现了石英玻璃的增材制造。该方法可以制造大尺寸的石英玻璃样品,但受限于石英玻璃的黏度特性,实际打印的分辨率约为 4 mm,难以制备高精度样品。2017年,德国卡尔斯鲁厄理工学院的 Kotz 等<sup>[23-25]</sup>将 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒分散在紫外敏感树脂中,利用 DLP 或 SLA 紫外光固化技术对其塑形,然后经过脱脂和烧结过程获得透明的石英玻璃样品,将制造的样品分辨率提高至几十微米,可打印微流通道或微光学透镜等精密结构。

在功能性石英玻璃和多组分玻璃的增材制备方面,2018年,浙江大学的 Qiu 等在石英玻璃中成功掺杂了 Eu、Tb 和 Ce 等稀土离子<sup>[26]</sup>和 YAG:Ce 荧光粉<sup>[27]</sup>,使稀土离子在 254 nm 波长激发下获得了可见光波段的激光,YAG:Ce 荧光粉充分利用了增材制造石英玻璃低烧结温度的特点,避免了传统熔融石英制造时高温下荧光粉与基质材料的反应,实现了内量子效率大于 90% 的发光,为功能性玻璃的增材制造奠定了基础。2020年,苏黎世联邦理工学院的 Moore 等<sup>[28]</sup>利用液态树脂的相分离实现了 Si/P/B 多组分玻璃的增材制造。表 1 详细总结了石英玻璃增材制造的代表性成果。可以发现,通过结合 SiO<sub>2</sub> 与有机物并利用不同增材制造技术塑形,然后经过脱脂和烧结获得透明玻璃样品是增材制造石英玻璃的主要方式,常见的有机物

表 1 石英玻璃的增材制造

Table 1 Additive manufacturing of the silica glasses

Year	Component			Method	Size /mm	Resolution	Ref.
	Glass	Dopant	Monomer				
2015	SiO <sub>2</sub>	—	—	FDM	~100	millimeters	[22]
2017	SiO <sub>2</sub>	Cr/V/Au	HEMA	DLP	1-10	tens of microns	[24]
2017	SiO <sub>2</sub>	—	Tetraglyme	DIW	10-20	~100 μm	[29]
2018	SiO <sub>2</sub>	—	TEOS	DLP	10-20	hundreds of microns	[30]
2018	SiO <sub>2</sub>	Ti	TEOS	DIW	10-20	tens of microns	[31]
2018	SiO <sub>2</sub>	Eu/Tb/Ce	HEMA	SLA	1-10	tens of microns	[26]
2020	SiO <sub>2</sub>	YAG:Ce	HEMA	SLA	20-90	tens of microns	[27]
2020	SiO <sub>2</sub>	P/B	UA	DLP	20-90	tens of microns	[28]
2020	SiO <sub>2</sub>	GeO <sub>2</sub>	TEOS	DIW	1-10	microns	[32]
2021	SiO <sub>2</sub>	—	HEMA	TPP	20-90	microns	[33]
2021	SiO <sub>2</sub>	—	PVB	IM	10-20	tens of microns	[34]
2022	SiO <sub>2</sub>	—	TMPETA	CAL	1-10	tens of microns	[35]

有羟基乙基甲基丙烯酸酯(HEMA)、四乙二醇二甲醚(Tetraglyme)、原硅酸四乙酯(TEOS)、聚氨酯丙烯酸酯(UA)、聚乙烯醇缩丁醛(PVB)和三甲醇丙烷乙酯三丙烯酸酯(TMPETA)。

### 3 石英光纤的增材制造技术

表 1 中增材制造的石英玻璃尺寸均较小,远远达不到光纤预制棒的尺寸,原因可能是预制棒的尺寸较大,导致脱脂后预制棒中容易残留杂质,且烧结后降温速度过慢也会导致析晶或陶瓷化,预制棒整体失透。为了解决该问题,本课题组给出了一种优化方案,成功利用 DLP 增材制造技术制造了单模光纤以及多模光

纤<sup>[17,36-38]</sup>,如图 1 所示。将气相 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒均匀分散到以甲基丙烯酸羟乙酯为主的单体中,并添加分散剂、交联剂、吸收剂和光引发剂,形成稳定的紫外敏感树脂,该过程中 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的尺寸、含量与分散的均匀性会直接影响光固化的精确度,如图 1(a)所示。利用 DLP 3D 打印机将紫外敏感树脂固化成预制棒,该过程中紫外光(UV)的能量会影响预制棒固化的精确度,也可能导致脱脂时预制棒的开裂,如图 1(b)所示。图 1(c)为光纤预制棒纤芯的制造过程。先将纤芯材料注入预制棒中,然后利用马弗炉进行热固化,在纤芯材料中添加 GeO<sub>2</sub> 材料以提高折射率,从而形成波导结构。将预制棒进行脱脂与预烧结处理,如图 1(d)

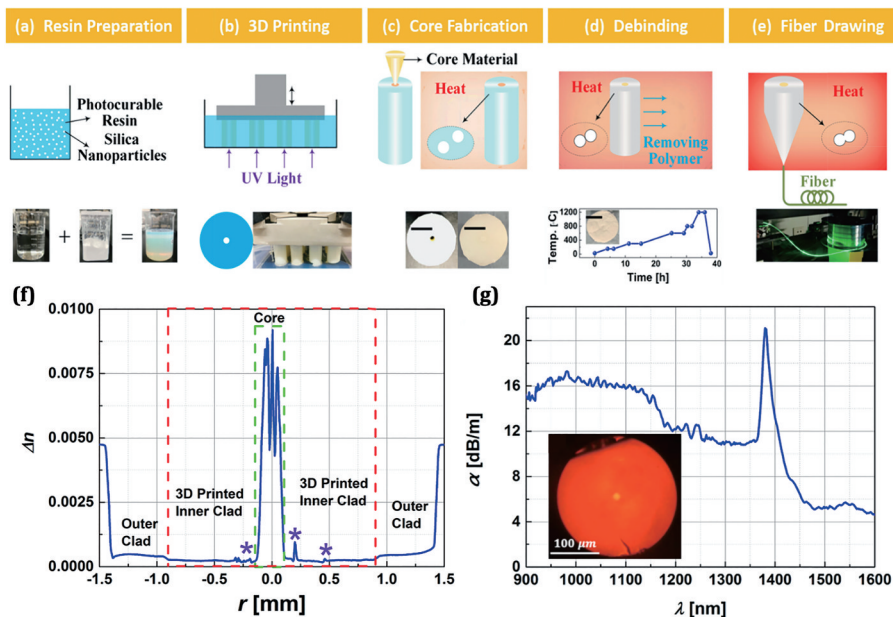


图 1 增材制造技术的优化方案。(a)~(e)利用 DLP 增材制造技术制备折射率阶跃型石英光纤的过程;(f)烧结完成后预制棒的折射率分布;(g)多模光纤的损耗光谱<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Optimization scheme of additive manufacturing technology. (a)~(e) Process of Fabrication of the step-index silica optical fiber using DLP additive manufacturing technology; (f) refractive index distribution of sintered preform; (g) loss spectrum of the multimode optical fiber<sup>[17]</sup>

所示。其中:脱脂的目的是去除有机物,整个过程与升温速度和目标温度相关,基于热重-差热分析(TG-DTA)法设置合适的温度可完全去除有机物;预烧结的目的是减小气相 $\text{SiO}_2$ 纳米颗粒之间的间距,提升预制棒的机械强度。将预制棒插入石英玻璃管中在真空条件下完成拉丝与烧结,如图1(e)所示。与直接对预制棒进行烧结的情况不同,烧结完成后在光纤尺寸下完成的,冷却速度比预制棒快,有效避免了析晶问题。对完成拉丝的预制棒尾段进行了折射率分析,得到包层、增材制造包层和热固化的纤芯折射率( $\Delta n$ )

沿径向( $r$ )的分布如图1(f)所示。其中,星号为未消除的空气或聚合物引起的折射率波动。多模光纤的损耗( $\alpha$ )随波长( $\lambda$ )的变化如图1(g)所示,插图为光纤的横截面。可以发现,光纤在1300 nm和1550 nm处的损耗分别为11 dB/m和5.8 dB/m,位于1380 nm处损耗为20.9 dB/m的 $\text{OH}^-$ 吸收峰表明光纤中的水含量和其他杂质较多,这也是引起石英光纤高损耗的主要因素。

2021年,本课题组将传统单模光纤和多模光纤延伸至了七芯铒钕共掺杂光纤(BEDF),并展示了多结构和多材料石英光纤的增材制造<sup>[18,38]</sup>。图2(a)为预制棒

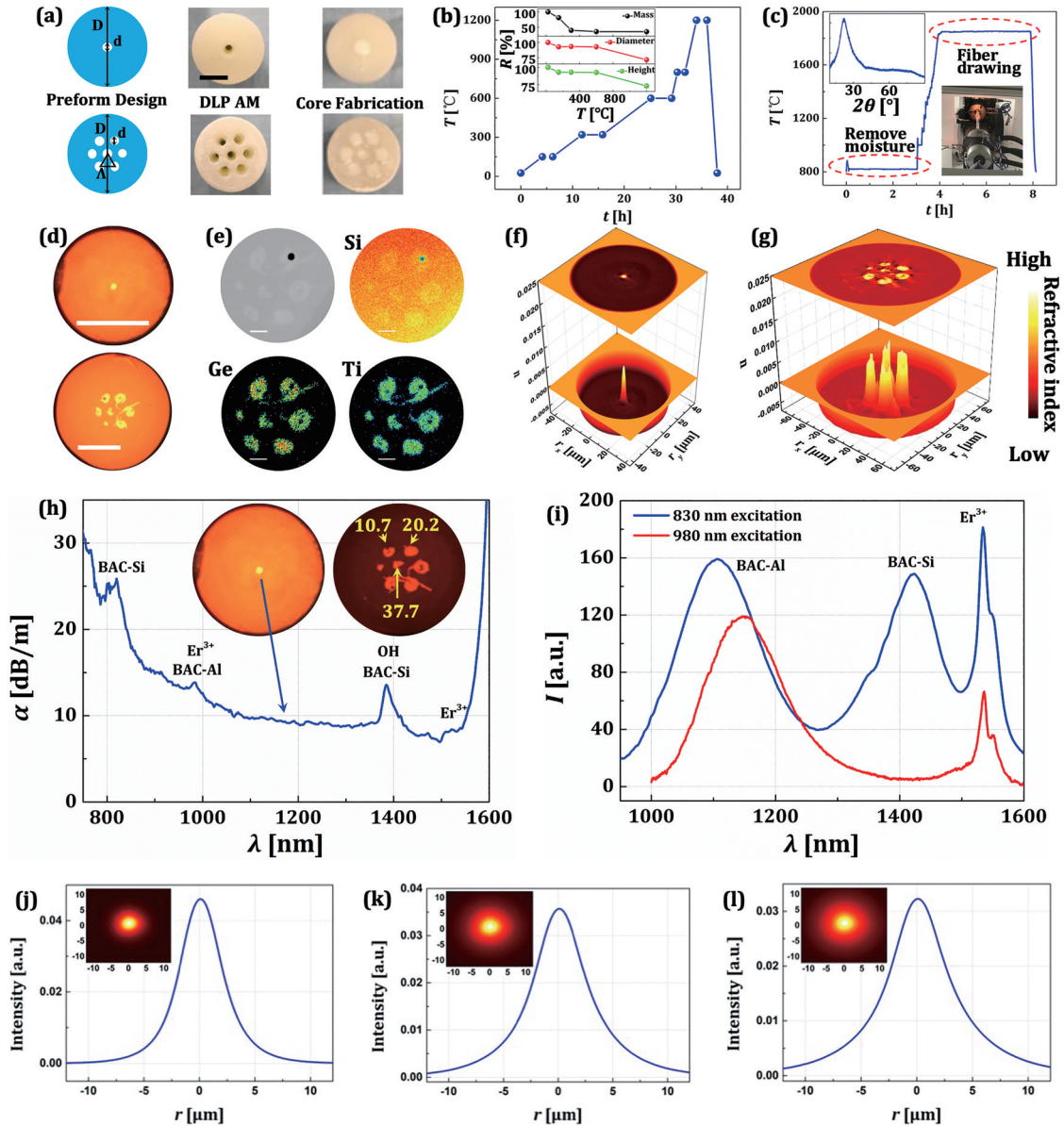


图2 BEDF的增材制造。(a)石英光纤预制棒的结构;(b)脱脂和预烧结的温度设置;(c)拉丝过程的温度变化;(d)BEDF的横截面;(e)BEDF的端面及其元素分布;(f)~(g)单芯BEDF与七芯BEDF的折射率分布;(h)单芯BEDF和七芯BEDF的损耗光谱;(i)单芯BEDF的发射光谱;(j)~(l)单芯BEDF的模式分析<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Additive manufacturing of BEDF. (a) Structure of silica fiber preform; (b) temperature settings for debinding and pre-sintering; (c) temperature variation during fiber drawing; (d) cross section of BEDF; (e) end face of BEDF and its element distribution; (f)~(g) refractive index distribution of single-core BEDF and seven-core BEDF; (h) loss spectrum of single-core BEDF and seven-core BEDF; (i) emission spectrum of single-core BEDF; (j)~(l) mode analysis of the single-core BEDF<sup>[18]</sup>

的设计结构。其中,预制棒的外径( $D$ )为 22 mm,芯径( $d$ )为 3 mm,芯间距( $\Delta$ )为 5 mm,长度为 20~100 mm。用与上述相同的方法完成增材制造和纤芯制造,不同的是在纤芯中掺杂入了 Al、Bi 和 Er。预制棒脱脂和预烧结过程的温度( $T$ )与时间( $t$ )如图 2(b)所示。可以发现,预制棒的质量和尺寸随温度的变化出现了明显变化:600 °C 之前,随着温度的升高,预制棒尺寸变化不明显,但质量逐渐变小,表明预制棒中的有机物逐渐挥发;600 °C 之后,随着温度的升高,预制棒的质量基本不变,但尺寸减小,表明有机物已经基本被去除。预制棒的直径和高度相比打印完成时的收缩率( $R$ )分别为 28% 和 27%,如果预制棒完全烧结成致密的玻璃状态,理论收缩率为 34%,但该过程只是为了提高预制棒的机械强度,以进行下一步的拉纤,因此,收缩率小于理论值。拉纤结束后,光纤的 X 射线衍射(XRD)图像、光纤端面图像、利用电子探针显微分析仪(EPMA)获得的元素分布与折射率分布分别如图 2(c)~图 2(g)所示。可以发现,光纤处于非晶态且具有良好的波导结构。此外,针对增材制造石英光纤中  $\text{OH}^-$  的吸收问题,在拉纤时加入了除水过程,即将光纤预制棒在真空环境与 810 °C 的条件下保温 3 h。多模光纤在 1380 nm 处的  $\text{OH}^-$  吸收峰损耗为 20.9 dB/m(20.9@1380),在拉纤过程中加入除水过程的 BEDF 中  $\text{OH}^-$  吸收峰损

耗为 12.7 dB/m, BEDF 的损耗光谱如图 2(h)所示。值得注意的是, BEDF 中的纳米颗粒 Bi 会引起较大的损耗,即除水过程降低的损耗不止 8.2 dB/m。图 2(g)为 830 nm 或 980 nm 激发下 BEDF 发光强度( $I$ )与波长的关系。可以发现, Bi 和 Er 在 1100 nm、1420 nm 和 1530 nm 波长处存在典型的发射峰,每个发射峰的模式分布如图 2(j)~图 2(l)所示。

2021 年,北京工业大学的 Zheng 等<sup>[39-40]</sup>通过光纤增材制造制造了直径约为 12 mm、长度为 20 mm 的掺 Yb 微结构光纤预制棒并完成拉纤。纤芯中掺杂了质量分数为 10% 的  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,包层中均匀分布了 6 个空气孔,相关信息如表 2 所示。其中: $D$ 为预制棒的外径; $L$ 为预制棒的长度; $d$ 为光纤直径; $d_c$ 为光纤纤芯的直径。采用 DLP 增材制造技术制备石英光纤预制棒存在的难点:1)气相  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒在紫外敏感树脂中容易出现团簇,打印时会造成散射,且长时间存放会产生沉淀;2)打印时制造参数的确定难度大,紫外光照射至树脂时会产生聚合效应使树脂固化,但过量的紫外光同样会对预制棒造成影响,导致预制棒脱脂或烧结时预制棒的开裂等问题;3)脱脂和烧结时加热速率和温度的选择是决定性的。去除所有有机物,保证高透明度和致密性,并尽可能避免因不均匀收缩导致脱脂过程中的裂缝和各向异性。

表 2 石英光纤的增材制造

Table 2 Additive manufacturing of the silica optical fibers

Year	Preform			Fiber					Ref.
	Printing method	Structure	Size /mm	Type	Size / $\mu\text{m}$	Cladding material	Core material	Loss	
2019	DLP	solid	$D=25$ , $L=50-100$	single mode	$d=131$ , $d_c=4$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-TiO}_2$	13.4@532 13.9@660 114@1550	[17]
2019	DLP	solid	$D=25$ , $L=50-100$	multi-mode	$d=242$ , $d_c=14$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-TiO}_2$	11@1300 5.8@1550	[17]
2019	SLS	solid	$D=12$	multi-mode	$d=200$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2$	23@800 28@1100	[20]
2019	SLS	microstructure	$D=40$	—	—	—	—	—	[20]
2020	DIW	solid	$D=2$ , $L=7$	multi-mode	$d=100$ , $d_c=40$	fluoride	$\text{SiO}_2\text{:Er}$	63@980 152@1535	[19]
2020	SLS	solid	$D=18$	—	$d=150$ , $d=11$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$	8.32@800 24@1100	[21]
2020	SLS	microstructure	$D=38$	—	—	—	—	—	[21]
2021	DLP	microstructure	$D=12$ , $L=20$	—	$d=110$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2\text{:Yb}$	11@800 14@1100	[40]
2022	DLP	solid	$D=22$ , $L=40-100$	single mode	$d=80$ , $d_c=3.5$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-TiO}_2\text{:}$ Al/Bi/Er	9.6@1300 6@1550	[18]
2022	DLP	solid	$D=22$ , $L=40-100$	seven-cores	$d=150$ , $d_c=3-11$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-TiO}_2\text{:}$ Al/Bi/Er	10.7@633	[18]

除了利用  $\text{SiO}_2$  与有机物混合且流动性较好的液态光敏树脂外,还可通过  $\text{SiO}_2$  与有机物混合的油墨利

用 DIW 增材制造技术制作石英光纤预制棒。DIW 技术是一种利用喷嘴按设定好轨迹挤出油墨逐层沉积三

维物体的技术。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室相继开发了  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ - $\text{GeO}_2$  溶胶-凝胶油墨<sup>[29,31-32]</sup>,利用 DIW 技术实现了多组分掺杂玻璃制造,为 DIW 制造多组分石英光纤提供了可能。2020 年,南安普顿大学的 Camacho-Rosales 等<sup>[19]</sup>利用 DIW 技术成功制造了外径为 2 mm、长度为 7 mm 的钼掺杂石英玻璃棒。制造时先将质量分数为 12% 的  $\text{SiO}_2$  和质量分数为 2% 的  $\text{ErCl}_3$  加入有机物中形成油墨,用 DIW 方式塑形后,经 600 °C 脱脂和 1500 °C 烧结成透明玻璃棒,插入氟化物玻璃管内形成具有折射率差的石英光纤预制棒,最后拉制成为外径为 100  $\mu\text{m}$ 、芯径为 40  $\mu\text{m}$  的多模掺钼石英光纤。光纤在 980 nm 和 1535 nm 处存在损耗分别为 62.98 dB/m 和 151.49 dB/m 的钼离子吸收峰。此外,由于有机物、杂质和残留的 OH 等因素,在 1380 nm 和 1030 nm 处表现出额外的吸收峰。随后, Camacho-Rosales 等<sup>[20]</sup>利用 SLS 方式制造了石英光纤预制棒。SLS 技术是一种利用激光选择性扫描粉末层逐层烧结在一起的制造技术。利用  $\text{CO}_2$  激光器直接烧结球形  $\text{SiO}_2$  粉末,避免了有机物的引入,构造了微结构光纤、反谐振光纤以及直径为 12 mm 玻璃棒,将玻璃棒插入石英管中进行拉纤。表征结果表明,在 800 nm 处光纤损耗依然较大,为 23 dB/m,原因是  $\text{SiO}_2$  粉末的尺寸和形状直接限制了石英光纤的整体密度,打印参数设置不准确也会导致打印结构的翘曲,引起光纤结构的改变。为了削弱这些影响,经逐步优化后制造了纤芯中含有  $\text{GeO}_2$  的多芯光纤预制棒,在 800 nm 处将损耗减小了 14.68 dB/m,但损耗依然较高,这些损耗主要来源于原材料的纯度、析晶以及光纤形状的变化<sup>[20-21]</sup>。

## 4 结 论

为满足特种石英光纤制造精确化、高效化以及低成本的需求,利用增材制造技术制备光纤预制棒成为重要的研究方向。目前,石英玻璃的增材制造主要分为熔融挤出、溶液固化与直接烧结三类。其中:熔融挤出仍然没有摆脱石英高黏度的特点,制造的分辨率较低,不适合特种石英光纤预制棒的制造;利用  $\text{SiO}_2$  和有机物结合成为溶液,再通过光固化等增材制造技术塑形,是目前石英玻璃和石英光纤预制棒增材制造的主要方式,但有机物的引入导致后期需要经过额外的脱脂过程,即使残留微量的有机物也会造成较高的损耗;直接烧结方法可以有效避免有机物,但制造精度以及制造过程中的陶瓷化等问题也制约着其发展。这三类技术均能充分利用增材制造技术在塑形方面低时间成本、低人工成本与低材料成本等优势,在复杂几何形状石英光纤的制造方面具有很大的潜力,但损耗、制造尺寸和多材料仍然是制约其发展的重要因素。此外,增材制造石英光纤的损耗主要来自于预制棒中的微泡、微裂纹、层间条纹、脱脂过程中未去除的有机物以

及原材料的纯度。在制造预制棒的尺寸方面,主要问题是预制棒尺寸较大,脱脂、烧结或冷却过程中应力分布不均匀以及层与层之间连接不紧密造成的开裂。对于多材料光纤的增材制造,如何平衡每种材料的熔点和热膨胀系数之间的关系,将玻璃、半导体、晶体、金属或聚合物集成到复合纤维中也是光纤增材制造研究的重点。目前,已有针对上述问题的系统研究,相信未来增材制造光纤也会经历低损耗、多结构、多材料的发展趋势,给光纤制造带来变革。

## 参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Kapron F P, Keck D B, Maurer R D. Radiation losses in glass optical waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1970, 17(10): 423-425.
- [3] MacChesney J B, O'Connor P B, Presby H M. A new technique for the preparation of low-loss and graded-index optical fibers[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(9): 1280-1281.
- [4] Miya T, Terunuma Y, Hosaka T, et al. Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. Electronics Letters, 1979, 15(4): 106-108.
- [5] Mears R J, Reekie L, Jauncey I M, et al. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54  $\mu\text{m}$ [J]. Electronics Letters, 1987, 23(19): 1026-1028.
- [6] 廉正刚, 陈翔, 王鑫, 等. 微结构和集成式功能光纤的制备和潜在应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170615.  
Lian Z G, Chen X, Wang X, et al. Preparation and potential applications of microstructured and integrated functional optical fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170615.
- [7] Geittner P, Küppers D, Lydtin H. Low-loss optical fibers prepared by plasma-activated chemical vapor deposition (CVD)[J]. Applied Physics Letters, 1976, 28(11): 645-646.
- [8] Schultz P C. Fabrication of optical waveguides by the outside vapor deposition process[J]. Proceedings of the IEEE, 1980, 68(10): 1187-1190.
- [9] Izawa T, Sudo S, Hanawa F. Continuous fabrication process for high-silica fiber preforms[J]. IEICE Transactions, 1979, 62(11): 779-785.
- [10] Knight J C, Birks T A, Russell P S, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [11] Birks T A, Knight J C, Russell P S. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.
- [12] Russell P S J. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.
- [13] 张晔明, 邱建荣. 基于 Melt-in-Tube 法制备的特种光纤及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17):

170601.  
Zhang Y M, Qiu J R. Fabrication and application of special optical fibers using Melt-in-Tube method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170601.
- [14] 沈晓冬. 3D 打印无机非金属材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.  
Shen X D. Inorganic non-metallic materials for 3D printing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [15] Cook K, Canning J, Leon-Saval S, et al. Air-structured optical fiber drawn from a 3D-printed preform[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3966-3969.
- [16] Cook K, Balle G, Canning J, et al. Step-index optical fiber drawn from 3D printed preforms[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(19): 4554-4557.
- [17] Chu Y S, Fu X H, Luo Y H, et al. Silica optical fiber drawn from 3D printed preforms[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5358-5361.
- [18] Chu Y S, Fu X H, Luo Y H, et al. Additive manufacturing fiber preforms for structured silica fibers with bismuth and erbium dopants[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 1-7.
- [19] Camacho-Rosales A L, Núñez-Velázquez M, Sahu J K. 3D printed Er-doped silica fibre by direct ink writing[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 243: 20002.
- [20] Camacho-Rosales A, Núñez-Velázquez M, Zhao X, et al. Development of 3-D printed silica preforms[C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [21] Camacho Rosales A L, Núñez Velázquez M M A, Zhao X, et al. Optical fibers fabricated from 3D printed silica preforms[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11271: 112710U.
- [22] Klein J, Stern M, Franchin G, et al. Additive manufacturing of optically transparent glass[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2015, 2(3): 92-105.
- [23] Kotz F, Plewa K, Bauer W, et al. Liquid glass: a facile soft replication method for structuring glass[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(23): 4646-4650.
- [24] Kotz F, Arnold K, Bauer W, et al. Three-dimensional printing of transparent fused silica glass[J]. *Nature*, 2017, 544(7650): 337-339.
- [25] Kotz F, Schneider N, Striegel A, et al. Glassomer: processing fused silica glass like a polymer[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(22): 1707100.
- [26] Liu C, Qian B, Ni R P, et al. 3D printing of multicolor luminescent glass[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(55): 31564-31567.
- [27] Zhang D, Xiao W G, Liu C, et al. Highly efficient phosphor-glass composites by pressureless sintering[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2805.
- [28] Moore D G, Barbera L, Masania K, et al. Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins[J]. *Nature Materials*, 2020, 19(2): 212-217.
- [29] Nguyen D T, Meyers C, Yee T D, et al. 3D-printed transparent glass[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(26): 1701181.
- [30] Cooperstein I, Shukrun E, Press O, et al. Additive manufacturing of transparent silica glass from solutions[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(22): 18879-18885.
- [31] Destino J F, Dudukovic N A, Johnson M A, et al. 3D printed optical quality silica and silica-titania glasses from sol-gel feedstocks[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(6): 1700323.
- [32] Sasan K, Lange A, Yee T D, et al. Additive manufacturing of optical quality germania-silica glasses[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(5): 6736-6741.
- [33] Doualle T, André J C, Gallais L. 3D printing of silica glass through a multiphoton polymerization process[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(2): 364-367.
- [34] Mader M, Schlatter O, Heck B, et al. High-throughput injection molding of transparent fused silica glass[J]. *Science*, 2021, 372(6538): 182-186.
- [35] Toombs J T, Luitz M, Cook C C, et al. Volumetric additive manufacturing of silica glass with microscale computed axial lithography[J]. *Science*, 2022, 376(6590): 308-312.
- [36] Peng G D, Luo Y H, Zhang J Z, et al. 3D silica lithography for future optical fiber fabrication[M]//Peng G D. *Handbook of Optical Fibers*. Singapore: Springer, 2019: 1-17.
- [37] Chu Y S, Canning J, Fu X H, et al. 3D printed optical preforms from silica contained resin[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11206: 112061L.
- [38] Chu Y S, Fu X H, Luo Y H, et al. 3D printed silica optical fibre—a “game changer” technology in optical fibre manufacture[C]//OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF), July 13-16, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2020: SoM3H.6.
- [39] Zheng B L, Wang J H, Yan P H, et al. Fabrication of silica leakage channel microstructured optical fiber based on 3D printed preforms[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11665: 116651R.
- [40] Zheng B L, Yang J, Qi F X, et al. Fabrication of Yb-doped silica micro-structured optical fibers from UV-curable nano-composites and their application in temperature sensing[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, 573: 121129.