

文章编号 1004-924X(2012)05-0988-08

超声技术在石英光纤腐蚀中的运用

钟年丙, 廖强*, 朱恂, 王永忠, 陈蓉

- (1. 重庆大学 低品位能源利用及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆大学 工程热物理研究所, 重庆 400030)

摘要: 为了获得光滑的腐蚀光纤表面并精确管理光纤的腐蚀直径, 采用自行设计的超声腐蚀系统, 在质量百分比浓度为 12.5% 的氢氟酸(HF)溶液中研究了超声功率和腐蚀温度对石英光纤包层、纤芯腐蚀速率以及腐蚀后光纤表面形貌的影响。研究表明: 在 HF 溶液中, 超声扰动有利于提高光纤的腐蚀速率, 光纤腐蚀速率与腐蚀时间呈非线性关系, 腐蚀表面随着腐蚀的进行越来越粗糙。基于研究结果, 进一步采用质量百分比浓度为 12.5% 的 HF 溶液和 25% 的 NH_4OH 溶液配制了缓冲氢氟酸(BHF)溶液, 探讨了光纤腐蚀速率及表面形貌的变化, 结果表明: 在 $V(\text{HF}) : V(\text{NH}_4\text{OH}) = 2$ 的 BHF 溶液中, 当超声功率为 165 W、腐蚀温度为 40℃ 时, 可获得光滑的腐蚀光纤表面和腐蚀速率与腐蚀时间的线性关系。

关键词: 超声扰动; 石英光纤; 缓冲氢氟酸; 表面形貌; 线性控制

中图分类号: TN25; TB559 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.0988

Application of ultrasonic technology to etching silica optical fiber

ZHONG Nian-bing, LIAO Qiang*, ZHU Xun, WANG Yong-zhong, CHEN Rong

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of the
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

* Corresponding author, E-mail: lqzx@cqu.edu.cn

Abstract: To obtain the smooth surface of an etched-fiber core and to precisely control the diameter of the etched-fiber, an ultrasonic etching system was developed. The effect of ultrasonic power and temperature on the etch rate of fibers (fiber cladding and fiber core) and the surface morphology of etched-fibers were investigated in the 12.5 % percentage concentration of HF solution, respectively. Experimental results indicate that the etch rate is enhanced by the ultrasonic agitation, the relationship between etch rate and etching time is nonlinear and the surface roughness is increased with the etching time in the HF solution. Thereafter, the Buffered HF (BHF) solution was promoted, and the BHF solutions were prepared by making use of 12.5 % HF solution and 25 % NH_4OH solution. The influence of BHF solutions on the etch rate and surface morphology was investigated. Obtained results reveal that the smooth surface of etched-fiber core and the linear relationship between etch rate and

收稿日期: 2012-01-13; 修订日期: 2012-02-21.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(No. 50825602); 国家自然科学基金重点项目(No. 51136007); 国家自然科学基金资助项目(No. 50976130)

etching time can be obtained in BHF solution when $V(\text{HF}):V(\text{NH}_4\text{OH})$ is 2, the ultrasonic power is at 165 W and the temperature at 40°C.

Key words: ultrasonic agitation; silica optical fiber; buffered HF acid; surface morphology; linear control

1 引言

光纤倏逝波传感器在化工、电化学、废水处理等领域扮演着重要的角色^[1-3]。这类传感器利用暴露纤芯表面的倏逝场与环境介质的相互作用,通过检测倏逝场能量的衰减或者波长的漂移来获得光纤表面物质的相关性质。然而,倏逝场的穿透深度与距波导表面的距离呈指数形式衰减,只有临近波导表面的物质才能与倏逝场作用^[4]。因此,加强纤芯表面倏逝场与环境介质的作用强度,是提高光纤倏逝波传感器灵敏度的关键。

目前,通常采用去除光纤包层甚至部分纤芯的方法来提高传感器的灵敏度,去除光纤包层(纤芯)的方法主要有腐蚀法和研磨法^[5-6]。研磨法在制备D形光纤和光纤端部加工方面具有独特的优势,但成本高,不易控制光纤的研磨程度。腐蚀法利用HF溶液,通过控制腐蚀时间制造出不同直径和长度的倏逝波光纤,成本低,不需要专业技术人员操作,可一次性腐蚀多根光纤。此外,通过配比不同的腐蚀剂,还可腐蚀出不同形状的光纤(如锥形光纤)^[7]。

腐蚀法加工制备光纤倏逝波传感器已有相当多的文献报道^[8]。Gupta等^[9]人的研究指出光纤倏逝波传感器的灵敏度与光纤直径有关。Khirjwani等人的^[10]研究表明,对于U型倏逝波光纤,在弯曲半径和感应区长度一定的条件下,传感器的灵敏度随着光纤直径的减小而增加。Machavaram等^[11]发现腐蚀后光纤的反射率受表面粗糙度的影响,并且较好的界面反射来源于光滑的腐蚀表面。曾毅波等人^[12]指出,在较低温度和浓度的KOH溶液中,通过超声技术能改善n型(100)4"硅片腐蚀表面的粗糙度,因为超声扰动有助于腐蚀液体分子的扩散迁移和腐蚀产物从腐蚀表面脱离。但是,Tso and Pask^[13]在利用氢氟酸(HF)腐蚀SiO₂时发现,即使在超声扰动条件

下,腐蚀后的SiO₂表面仍然很粗糙。Chen^[14]的研究指出缓冲HF酸(BHF)溶液能改变SiO₂表面的粗糙度,但并未报告在SiO₂中掺入GeO₂后的腐蚀形貌。为研究多模掺Ge石英光纤的腐蚀特性,以制备出直径较细且表面光滑的光纤,本文采用自行设计的用于腐蚀光纤的超声波装置,研究了在HF及BHF溶液中,超声功率和温度对光纤腐蚀速率及光纤表面形貌的影响。

2 实验系统与步骤

2.1 超声腐蚀器系统

实验采用自行设计的超声腐蚀系统,如图1所示。系统主要由腐蚀反应器、超声清洗机、自吸泵、恒温水浴、温度传感器等几部分组成。腐蚀反应器材料为聚四氟乙烯(PTFE),PTFE是一种良好的耐酸腐蚀材料。虽然HF/BHF溶液能腐蚀一般的塑料容器,却不腐蚀PTFE容器(即使在温度为90°C时)。腐蚀反应器体积为250 mm×130 mm×80 mm,壁厚为2 mm。腐蚀反应器分为3个区域,位于两端的两个区域为密封区域,用于保护光纤尾端远于腐蚀剂(HF或BHF溶液);位于中心的区域为光纤腐蚀区域(150 mm×110 mm×50 mm)用于腐蚀光纤。超声清洗机(DL-

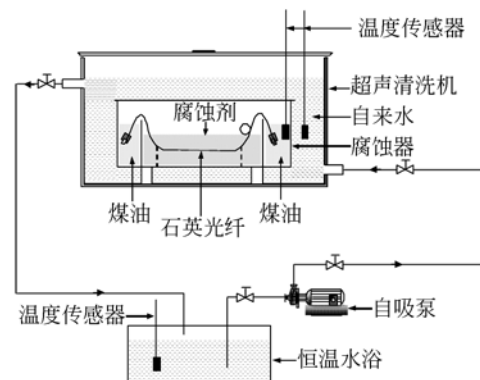


图1 超声腐蚀系统

Fig. 1 Ultrasonic etching system

180D, 上海,)的超声频率为 40 kHz, 超声功率在 0~180 W 内可调。腐蚀反应器和超声清洗机的温度采用耐 HF 酸的热电偶进行测量(精度 $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$)。系统温度利用恒温水浴(可控温度为室温到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$)和自吸水泵(5 L/min)控制, 系统管道采用保温隔热材料密封(厚 40 mm), 确保腐蚀剂在整个腐蚀时间内温度波动范围在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

2.2 光纤和腐蚀剂

光纤采用梯度型掺锗多模石英光纤, 光纤直径为 $(125\pm 1.0)\text{ }\mu\text{m}$, 纤芯直径为 $(62.5\pm 0.5)\text{ }\mu\text{m}$ (上海)。为获得裸光纤, 在室温条件下($13\text{ }^{\circ}\text{C}$), 将长度为 1 500 mm, 两端连有 FC 接头的光纤中心区域 120 mm 浸入浓硫酸中, 静置 15 min 左右后, 去除表面涂敷层。然后, 利用去离子水冲洗 5 min, 去除光纤表面的 H^+ 和 SO_4^{2-} 离子。最后, 运用沾有无水乙醇的纱布擦洗 2 min, 确保光纤表面的涂敷层完全去除, 并保存在蒸馏水中。

光纤腐蚀剂采用质量百分比浓度为 40% 的 HF 酸和蒸馏水配制成浓度为 12.5% 的 HF 溶液。BHF 酸溶液采用质量百分比浓度为 25% 的氨水(NH_4OH)和 12.5% 的 HF 酸溶液按不同体积比配制。

2.3 实验步骤

首先, 开启自吸水泵让系统运行 20 min, 确保系统温度达到平衡; 然后, 取出腐蚀反应器, 将制作好的裸光纤固定在腐蚀反应器的腐蚀区, 带有 FC 连接头的尾端置于腐蚀器的密封区; 接着, 分别向密封区内滴加煤油(滴加煤油是为了防护腐蚀过程挥发的腐蚀剂对 FC 接头产生腐蚀), 向腐蚀区内滴加腐蚀剂(HF 或者 BHF 溶液), 启动腐蚀实验。

腐蚀结束后立即取出光纤, 用去离子水清洗 5 min, 并用氮气吹干。腐蚀后的光纤直径采用光学显微镜测量, 精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ (SMARTe-320, 重庆)。光纤腐蚀速率(R)由 $R = dD_F/2d\tau$ 计算, 其中 D_F 为光纤直径(μm), τ 为腐蚀时间(min)。光纤腐蚀速率相对增长率(RGR)由 $\text{RGR} = 100\% \times (R_2 - R_1)/R_1$ 计算, 其中 R_1 为无扰动下的腐蚀速率($\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$), R_2 为超声扰动下的腐蚀速率($\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)。光纤表面形貌采用 TESCAN 可变电子真空扫描电子显微镜测量, 精度为 3.0 nm (Czech Republic)。

3 实验结果与讨论

3.1 超声功率对腐蚀速率的影响

多模掺锗石英光纤包层由纯净的 SiO_2 组成, 纤芯由 SiO_2 和 GeO_2 组成, GeO_2 含量由包层和纤芯的分界面向纤芯中心不断增加。Spierings^[15] 研究表明: 光纤的腐蚀速率与 GeO_2 的含量有关, GeO_2 的含量越高腐蚀速率越快; 同时也指出 SiO_2 于 HF 酸反应是一个动力学控制过程, 腐蚀速率几乎不受扰动的影响。然而 Liang^[16] 指出: 腐蚀过程中, 对腐蚀剂进行扰动能够提高 SiO_2 的腐蚀速率。为研究超声功率对光纤包层和纤芯腐蚀速率的影响, 在温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 采用配制的质量百分比浓度为 12.5% 的 HF 溶液, 对光纤进行了不同超声功率下的腐蚀实验, 获得的光纤包层和纤芯腐蚀速度随超声功率的变化如图 2 所示。

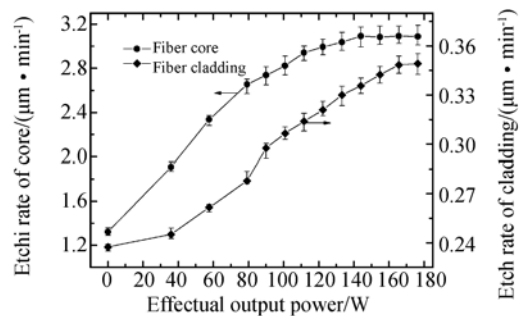
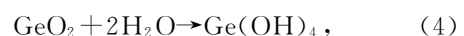
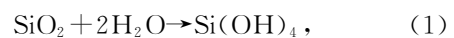
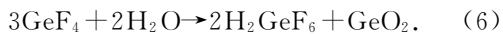
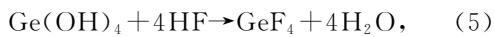


图 2 腐蚀速率与超声功率关系曲线图(12.5%, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 2 Etching rate of fiber in HF acid solution as a function of ultrasonic power (12.5%, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

由图可知, 光纤包层和纤芯的腐蚀速率随着超声功率的增大而增加; 纤芯的腐蚀速率在超声功率达到 145 W 之后趋于恒定, 而光纤包层的腐蚀速率在超声功率超过 165 W 时趋于恒定。在超声功率 165 W 时光纤包层和纤芯的腐蚀速率是无超声作用时的 1.47 倍和 2.34 倍。这主要是由于在此条件下光纤腐蚀速率主要受传质速率控制, 超声扰动加强了腐蚀过程中的传质速率所致。

光纤与 HF 溶液的反应步骤可描述如下^[17-18]:





由上述反应机理知,在光纤溶解过程中会产生气泡($\text{SiF}_4, \text{GeF}_4$)和溶胶($\text{H}_2\text{SiF}_6, \text{H}_2\text{GeF}_6$)。在无扰动情况下,腐蚀产物会在光纤表面聚集,从而阻碍腐蚀剂到达光纤表面进行反应;而当实施超声时,超声扰动加快了腐蚀产物中的气泡和溶胶从光纤表面分离的速率,从而提高了腐蚀剂中的活性成分($\text{H}_2\text{F}_2, \text{HF}_4^-$)到达光纤表面的速率,进而提高了光纤腐蚀速率。

当超声功率超过某一值时,例如对光纤包层进行腐蚀,超声功率超过 165 W 时,再继续增大超声功率,腐蚀速度无明显变化。这是由于 165 W 的超声扰动足够将腐蚀产物从光纤表面分离,此时光纤腐蚀速率主要由化学反应速率控制。

由图 2 可知:光纤纤芯的腐蚀速率远大于光纤包层的腐蚀速率。这是因为:虽然 Ge 在二氧化锗中的四面体网络结构与 Si 在熔融石英中的四面体网络相似,但是 Ge—O 键的溶解键能(662 kJ/mol)小于 Si—O 键的溶解键能(799 kJ/mol)^[11]。在相同腐蚀条件下,键能越低溶解速度越快。因此,光纤纤芯的腐蚀速率远高于包层的腐蚀速率,导致光纤的腐蚀过程是一个非线性行为。

为了进一步说明光纤在 HF 酸中的非线性腐蚀行为,图 3 描述了光纤腐蚀速率(光纤直径)随腐蚀时间的变化。在光纤包层区域,腐蚀速率增加非常缓慢;在光纤纤芯区域,腐蚀速率随着腐蚀时间迅速加快。在整个腐蚀时间内,光纤腐蚀速率与腐蚀时间呈现出高度非线性关系,而这种非线性腐蚀过程对光纤腐蚀直径的精确控制非常不利。

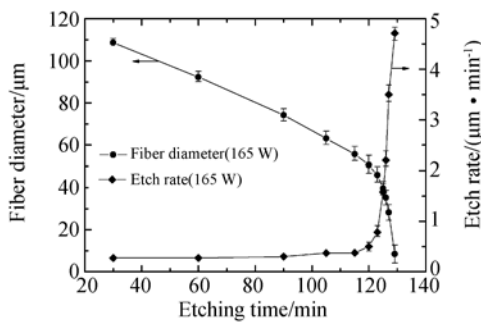


图 3 腐蚀速率与腐蚀时间关系曲线图(12.5%, 40 °C)
Fig. 3 Etching rate of fiber in HF acid solution as a function of etching time (12.5%, 40 °C)

3.2 HF 温度对腐蚀速率的影响

尽管温度对腐蚀速率的影响已有报道^[19],但均未涉及超声扰动下的影响规律。本文在引入超声扰动条件下,研究了温度对光纤包层腐蚀速率的影响,实验结果如图 4 所示,其中腐蚀剂为质量百分比浓度为 12.5% 的 HF 溶液,超声功率为 165 W,并将实验结果与未超声工况进行了对比。

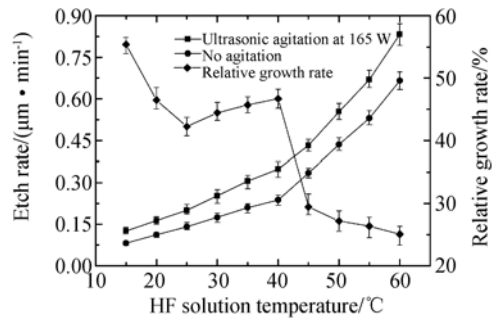
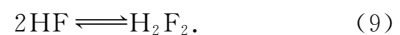
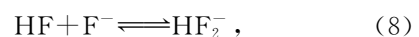
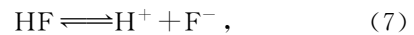


图 4 光纤包层腐蚀速率/相对增长率与温度间的曲线关系
Fig. 4 Temperature dependence of etch rate/RGR of fiber cladding in HFA

由图可知,在 15~40 °C,光纤包层腐蚀速率随着温度的增加而线性增大,其增长速率分别为 $8.89 \times 10^{-3} \mu\text{m} \cdot (\text{min} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 和 $6.25 \times 10^{-3} \mu\text{m} \cdot (\text{min} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。在 40~60 °C 高温区,光纤包层腐蚀速率仍然随着温度增加而迅速线性增大,但有超声和无超声时的增长速率分别提高至 $2.42 \times 10^{-2} \mu\text{m} \cdot (\text{min} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 和 $2.14 \times 10^{-2} \mu\text{m} \cdot (\text{min} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

此外,从图 4 中的光纤腐蚀速率相对增长率(RGR)的变化可以看出:温度为 15 °C 时,超声扰动对提高光纤腐蚀速率的效率最高,RGR 为 55.39%。这是因为 HF 酸是弱酸,在水溶液中存在如下的电离平衡关系式^[17]:

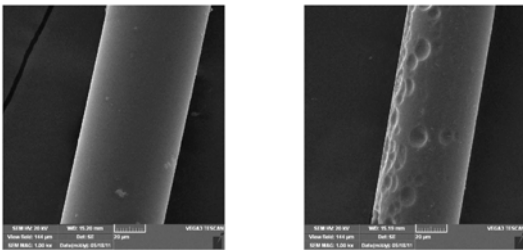


低温时,离子的活性和移动速度受到抑制。因此,当腐蚀剂温度很低时,光纤腐蚀速率同时受化学反应速率控制和传质控制。超声扰动可提高活性成分和腐蚀产物的传质速率,从而提高光纤的腐蚀速率。在 15~25 °C,RGR 随着温度的升高而迅速下降;在 25 °C 时,RGR 为 42.23%。这是因为:随着温度的升高,活性成分的主动扩散速

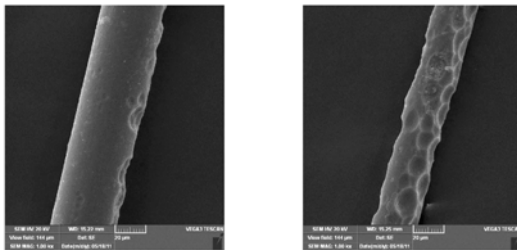
率增快,超声扰动的传质强化作用相对减弱。在 25~40 °C, RGR 又缓慢增大,在 40 °C 时增大到 46.69%,这主要由于此时超声扰动加快了累积的腐蚀产物从光纤表面脱离的速率。在 40~60 °C, RGR 快速下降到 25.05%,这是因为在高温条件下,光纤的腐蚀速率主要受控于自身的化学反应速率,而超声扰动效应的贡献减弱。以上分析表明:在低温时,光纤腐蚀反应主要由传质控制,超声扰动强化作用明显;在高温时,光纤的腐蚀速率主要由化学反应速率控制,受超声扰动影响较小。

3.3 HF 溶液中不同腐蚀时间下的光纤表面形貌

光纤的表面形貌对光纤传感器的灵敏度有很大影响。Ohwada 等^[20]利用 KOH 溶液腐蚀(110) Si 片发现:扰动能改善腐蚀后 Si 片的表面粗糙度,并且超声搅拌优于其他的机械搅拌方法。但是 Spierings^[15]指出,玻璃(SiO₂)在 HF 溶液中腐蚀后的表面形貌与掺杂成分有关。为了考察超声扰动腐蚀对光纤表面形貌的影响,对 165 W 超声扰动条件下经历不同腐蚀时间的光纤进行了 SEM 扫描,结果如图 5 所示。



Sample A (101 min, 66 μm) Sample B (115 min, 56 μm)



Sample C (122 min, 42 μm) Sample D (127 min, 29 μm)

图 5 光纤表面形貌放大 1 000 倍下的 SEM 照片(165 W, 40 °C, 12.5%)

Fig. 5 SEM images of etched-fiber surface morphology at a magnification 1 000 (165 W, 40 °C, 12.5%)

SEM 图片显示,光纤包层在 HF 溶液中腐蚀 101 min 后,光纤表面光滑,如 Sample A 所示。这是因为光纤包层由 SiO₂ 组成,腐蚀过程为同性腐蚀。随着腐蚀时间的延长,光纤被腐蚀至纤芯,光纤直径逐渐变小,而光纤表面却越来越粗糙,如 Sample B~Sample D 所示。这是因为 GeO₂ 的含量在光纤纤芯中不断增加,异性腐蚀越来越明显。

对于光纤倏逝波传感器,用于感应区的光纤直径越小传感器越灵敏,并且腐蚀后表面越光滑的光纤其光谱传输特性越好。因此,本文进一步优化了腐蚀条件,拟制备出直径较小且表面光滑的腐蚀光纤。

3.4 BHF 溶液对光纤腐蚀速率和表面形貌的影响

由于光纤包层和纤芯成分不同,导致光纤纤芯在 HF 溶液中的腐蚀速率快于光纤包层的腐蚀速率(如 3.1 节描述)。为了使光纤纤芯的腐蚀速率接近于光纤包层的腐蚀速率,从而实现光纤腐蚀过程的线性控制,本文采用质量百分比为 25% 浓度的氨水(NH₄OH)和 12.5% 浓度的 HF 溶液按不同体积比例配制了 BHF 酸溶液,如表 1 所示。

表 1 BHF 溶液
Tab. 1 Buffered HF acid solutions

腐蚀剂	样品							
	1	2	3	4	5	6	7	8
HF acid/ml	84	84	84	84	84	84	84	84
NH ₄ OH/ml	12	14	17	21	24	28	34	42

氨水(NH₄OH)是一种弱碱,在水溶液中发生部分电离:



该电离平衡关系式表明,在酸性环境中,氨水的电离平衡将向正向移动。结合式(7)~(9)可以看出,将氨水加入到 HF 溶液中, HF 和 NH₄OH 的电离平衡遭到破坏, BHF 溶液中的物质成分和浓度发生改变,活性成分(H₂F₂、HF₂⁻)的浓度不断增加,而具有催化作用的 H⁺ 浓度不断减少。实验观察证明,这种改变将有利于改善光纤的腐蚀速率和光纤表面粗糙度。

图 6 为光纤包层和纤芯在 BHF 溶液中的腐蚀速率曲线。光纤纤芯和包层的腐蚀速率都随着

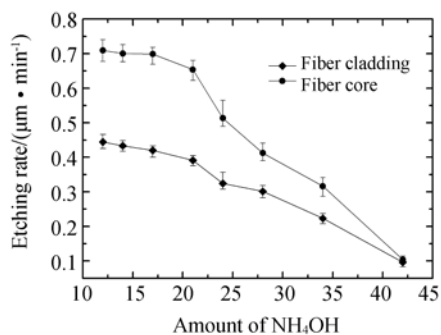
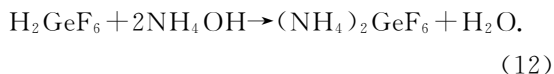
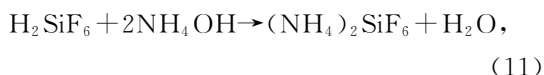


图 6 光纤在 BHF 溶液中的腐蚀速率(165 W, 40 °C)

Fig. 6 Etching rate of fiber in BHF solutions (165 W, 40 °C)

NH₄OH 溶液的增加而减小,但是光纤纤芯的腐蚀速率比光纤包层的腐蚀速率下降得更为迅速。当向 84 ml 的 HF 酸溶液中添加 42 ml 的 NH₄OH,即 V(HF) : V(NH₄OH) = 2 : 1 时,光纤纤芯的腐蚀速率接近于光纤包层的腐蚀速率。这主要由 2 个原因造成:(1)随着 NH₄OH 溶液向 HF 溶液中不断地加入,受活性成分(H₂F₂ 和 HF₂⁻)浓度控制的光纤包层的腐蚀速率得到提高,而主要由 H⁺浓度控制的光纤纤芯的腐蚀速率受到抑制(当 BHF 溶液的 pH ≥ 7 时,光纤不会被溶解/腐蚀)。(2)随着 NH₄OH 的加入,光纤的化学反应机理发生了改变。在 BHF 溶液中,反应中间产物溶胶状的 H₂SiF₆ 和 H₂GeF₆ 会进一步发生如下化学反应^[18],从而成为溶解于液相的最终产物:



因而,在 165 W 的超声扰动下,新鲜的腐蚀剂和液相腐蚀产物能及时到达和脱离光纤表面,光纤纤芯和光纤包层的腐蚀速率在 BHF 溶液中均得到改良。

为了进一步说明光纤在 BHF 溶液中能实现线性控制,图 7 给出了光纤在 V(HF) : V(NH₄OH) = 2 : 1 的 BHF 溶液中腐蚀速率(光纤直径)随腐蚀时间的变化。从图中可以看出,光纤腐蚀速率和光纤直径均与腐蚀时间成较好的线性关系。这应该是由随着 NH₄OH 溶液向 HF 溶液中的加入, HF 溶液中的物质成分和浓度发生了改变,致使

H₂F₂ 和 HF₂⁻ 攻击光纤的路径和化学反应机理发生了改变,从而使光纤纤芯(SiO₂ 和 GeO₂)由异性腐蚀转变为同性腐蚀,也有利于获得良好的腐蚀光纤表面。图 8 为光纤在 BHF 溶液中进行超声腐蚀后的表面形貌。可看出,经过在 BHF 溶液中进行的超声腐蚀,获得了光滑的腐蚀光纤表面。这表明利用 BHF 溶液腐蚀光纤,不但能改良光纤的腐蚀速率,还能实现光纤腐蚀过程的线性控制,从而有利于精确管理光纤的腐蚀直径,更为重要的是能获得光滑的腐蚀光纤表面。

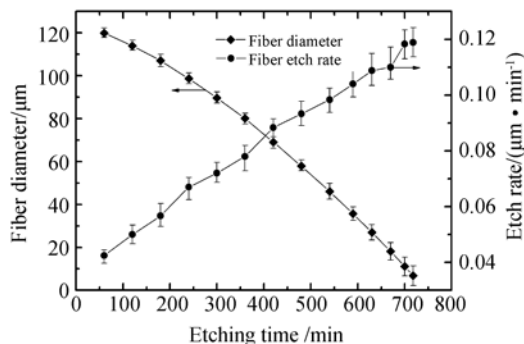


图 7 在 BHF 溶液中光纤腐蚀速率/直径与腐蚀时间的关系曲线图[V(HF) : V(NH₄OH) = 2 : 1, 165 W, 40 °C]

Fig. 7 Fiber etch rate/diameter in BHF solution as a function of etching time [V(HF) : V(NH₄OH) = 2 : 1, 165 W, 40 °C]

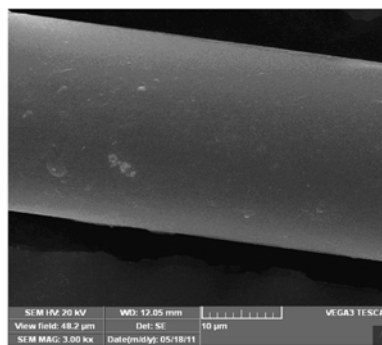


图 8 光纤表面形貌(29 μm)放大 3 000 倍下的 SEM 照片

Fig. 8 SEM images of 29 μm etched-fiber surface morphology at a magnification 3 000

4 结 论

对超声技术在石英光纤腐蚀中的应用开展了

研究,讨论了超声功率、腐蚀温度及缓冲腐蚀剂的影响,实验结果表明:超声扰动有助于提高腐蚀剂和腐蚀产物的传质速率,改良光纤的腐蚀速率。在 HF 溶液中光纤会发生异性腐蚀,很难获得光滑的腐蚀表面,光纤腐蚀速率与腐蚀时间呈非线性关系。在 BHF 溶液中,随着 NH_4OH 的加入改变了 HF 溶液中的物质成分和浓度,从而改变

了活性离子的攻击路径和化学反应步骤。当 $V(\text{HF}) : V(\text{NH}_4\text{OH}) = 2$, 超声功率为 165 W, 温度为 40°C 时,获得了光滑的腐蚀光纤表面和光纤腐蚀速率与腐蚀时间的线性关系。这种通过超声扰动 BHF 溶液腐蚀光纤的方法是一种既能获得光滑腐蚀光纤表面,又能精确管理光纤腐蚀直径的有效方法。

参考文献:

- [1] GONALVES H M R, DUARTEB A J, ESTEVES S J C G. Optical fiber sensor for Hg (II) based on carbon dots [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 26(4):1302-1306.
- [2] ZHU S Y, CHEN Y P, ZHANG G, *et al.*. A near-infrared optical fiber sensor for carbon monoxide concentration monitoring [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 52(10): 2192-2195.
- [3] 赵明富, 钟年丙, 罗彬彬, 等. 用于生物量浓度在线检测的光纤衰减全反射传感器[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(8):1707-1714.
ZHAO M F, ZHONG N B, LUO B B, *et al.*. Optical fiber attenuated total reflection sensor for on-line measurement of biomass concentration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1707-1714. (in Chinese)
- [4] PHILIP C R, SCULLY P J, ELDRIDGE P, *et al.*. An optical fiber sensor for biofilm measurement using intensity modulation and image analysis [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(5):764-772.
- [5] GONG Y, GUO Y, RAO Y J, *et al.*. Fiber-optic fabry-P rot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(23): 1708-1710.
- [6] CHANDANI S M, JAEGER N A F. Fiber-optic temperature sensor using evanescent fields in D fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 17(12):2706-2708.
- [7] MONONOBE S, OHTSU M. Fabrication of it pencil-shaped fiber probe for near-field optics by selective chemical etching [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(10):2231-2235.
- [8] GONALVES H M R, MAULE C D, JORGE P A S, *et al.*. Fiber optic lifetime pH sensing based on ruthenium (II) complexes with dicarboxybipyridine [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 626(1):62-70.
- [9] GUPTA B D, DODEJA H, TOMAR A K. Fibre-optic evanescent field absorption sensor based on a U-shaped probe [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, 28(1):1629-1639.
- [10] KHIJWANIA S K, SRINIVASAN K L, SINGH J P. An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, 104(2):217-222.
- [11] MACHAVARAM V R, BADCOCK R A, FERNANDO G F. Fabrication of intrinsic fibre Fabry-Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching [J]. *Sens. Actuators A*, 2007, 138(1):248-260.
- [12] 曾毅波, 王凌云, 谷丹丹, 等. 超声技术在硅湿法腐蚀中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(1):166-171.
ZENG Y B, WANG L Y, GU D D, *et al.*. Application of ultrasonic technology to wet etching of silicon [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 166-171. (in Chinese)
- [13] TSO S T, PASK J A. Reaction of glasses with hydrofluoric acid solution [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1982, 65(7):360-362.
- [14] CHEN X P. *Fiber Optic Pressure Sensor Fabrication Using MEMS Technology* [D]. Blacksburg, Va: University Libraries, Virginia Polytechnic institute and state university, 2003.
- [15] SPIERINGS G A C M. Wet chemical etching of silicate-glasses in hydrofluoric-acid based solutions [J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(23):6261-6273.
- [16] LIANG D T, READEY D W. Dissolutions kinet-

ics of crystalline and amorphous silica in hydrofluoric-hydrochloric acid mixtures [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1987, 70(8):570-577.

- [17] 苏英,周永恒,黄武,等. 石英玻璃与 HF 酸反应动力学研究[J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(3): 288-293.

SU Y, ZHOU Y H, HUANG W, *et al.*. Study on reaction kinetic between silica glasses and hydrofluoric acid [J]. *Journal of the Ceramic Society*, 2004, 32(3): 288-293. (in Chinese)

- [18] ZOSKI C G. *Handbook of Electrochemistry* [M]. Elsevier's Science & Technology, 2007:418.

- [19] LEE M T. Reaction of high-silica optical fibers with hydrofluoric acid [J]. *J. Am. Cer. Soc.*, 1984 67(2): C-21-22.

- [20] OHWADA K, NEGORO Y, KONAKA Y, *et al.*. Uniform groove-depths in (110) Si anisotropic etching by ultrasonic waves and application to accelerometer fabrication [J]. *Sens. Actuators A*, 1995, 50(1):93-98.

作者简介:



钟年丙(1981—),男,重庆云阳人,博士研究生,2006年、2010年于重庆理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微生物能源、生化信息获取与光纤传感等方面的研究。E-mail: zhongnianbing@163.com

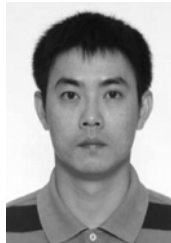


王永忠(1968—),男,四川资阳人,博士,副教授,硕士生导师,1990年于重庆师范大学获得学士学位,2008年于重庆大学获得博士学位,主要从事生物工程、环境微生物学及环境治理中的热物理问题等方面的研究。E-mail: wangyzz@cqu.edu.cn

导师简介:



廖强(1965—),男,福建武平人,博士,新世纪百千万人才工程国家级人选,国家杰出青年科学基金项目获得者,教育部“长江学者”特聘教授,博士生导师,1985年于华中科技大学获得学士学位,1993年于重庆大学获得博士学位,主要从事界面现象和微尺度传输机理及特性、环境与能源生物技术中的热物理问题等方面的研究。E-mail: lqzx@cqu.edu.cn



陈蓉(1977—),男,福建南平人,博士,副教授,硕士生导师,2000年、2003年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,2007年于香港科技大学获得博士学位,主要从事环境治理中的关键热物理问题等方面的研究工作。E-mail: rchen@cqu.edu.cn



朱恂(1968—),女,江苏无锡人,博士,教授,博士生导师,1990年于上海交通大学获得学士学位,2002年于重庆大学获得博士学位,主要从事新能源技术及新能源动力、能源与环境生物技术中的热物理问题和现代强化传热传质等方面的研究。E-mail: zhuxun@cqu.edu.cn