

文章编号 1004-924X(2013)08-1966-08

流动腐蚀方式对石英光纤湿腐蚀特性的影响

钟年丙,王永忠,廖 强*,朱 恂,陈 蓉

(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;

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,本文从光纤腐蚀的传质及动力学特性出发,设计了一种流动腐蚀光纤装置。采用质量百分比浓度为 12.5% 的氢氟酸(HF)溶液,研究了石英光纤的组成成分、腐蚀剂温度和流速对腐蚀速率以及腐蚀后光纤表面形貌的影响。实验结果及理论分析表明:光纤腐蚀速率和表面粗糙度受化学反应速率和传质速率控制;由于光纤纤芯与包层成分不同,导致纤芯腐蚀速率高于包层腐蚀速率;在静态腐蚀条件下,腐蚀速率随温度呈非线性增长,且腐蚀后光纤表面粗糙;在流动腐蚀条件下,光纤腐蚀速率提高,并与温度呈线性关系,腐蚀后光纤表面粗糙度随流速的增加呈现出先减小后增大的趋势;在流速为 0.75 L/min 时,获得了光滑的腐蚀光纤表面。

关键词:石英光纤;流动腐蚀;光滑表面;传质;动力学

中图分类号:TN25 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132108.1966

Effect of flow etching method on wet etching properties of silica optical fiber

ZHONG Nian-bing, WANG Yong-zhong, LIAO Qiang*, ZHU Xun, 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: lqz.x@cqu.edu.cn

Abstract: To obtain a smooth surface of etched-fiber core, a flow etching system was developed based on mass-transfer and dynamic response characteristics in silica optical fiber etching processes. The effects of fiber composition, etchant temperature and flow rate on the etching rate of fibers and the surface morphology of etched-fibers were investigated in the mass percent concentration of Hydrofluoric Acid (HFA) at 12.5%, respectively. The experimental and theoretical studies show that the etching rate and the surface roughness of the etched-fibers are controlled by the chemical reaction rate and mass transfer rate. The etching rate of fiber core is higher than that of fiber cladding because of the compositional difference between the fiber core and fiber cladding. In the static etching condition, the increase of the etching rate is nonlinear with temperature, and the etched-fiber gives a rough surface. Moreover, in the flow etching condition, the etching rate is improved and is linear with tempera-

收稿日期:2013-02-21;修订日期:2013-04-01.

基金项目: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. 51106188);重庆市自然科学基金重点资助项目(No. CSTC2013JJB0057)

ture, and the roughness of the etched-fiber core increases at first and then decreases with the increase of etchant flow rate. The results also show that the etched-fiber core with smooth surfaces can be repeatedly obtained with the etchant flow rate at 0.75 L/min.

Key words: silica optical fiber; flow etching; smooth surface; mass-transfer; dynamics

1 引 言

石英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]。光纤倏逝波传感器的制作方法主要有研磨法和酸蚀刻法^[4-5]。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,光纤的研磨程度难以控制^[6]。腐蚀法利用 HF 溶液,通过控制腐蚀时间可以制造出不同直径和长度的倏逝波光纤。该方法成本低,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,还可制作出不同形状的光纤,如锥形光纤等^[7]。但是, Machavaram 等^[8]研究发现腐蚀后光纤表面的粗糙度对光谱传输质量及传感器性能的影响显著,较好的界面反射来源于光滑的腐蚀表面。同时, Lu 等^[9]和 Gehrig 等^[10]指出腐蚀后光纤表面凹陷将影响光纤传感器的机械性能。因此,如何获取光滑的蚀刻光纤表面,是提高光纤倏逝波传感器性能的关键。

腐蚀石英光纤的溶剂通常采用氢氟酸(HF)或 BHF 溶液(HF+NH₄OH/HNO₃),其化学反应过程非常复杂^[11]。Schwartz 等^[12]为了定量评估传质速率对化学反应过程的影响,在静态下利用蚀刻剂对硅片进行了大量实验研究,发现腐蚀过程主要受化学反应速率控制。Baranski 等^[13]利用有限元结合水平集算法模拟了无扰动和扰动条件下 BHF 溶液对硅片腐蚀速率的影响,指出在一定腐蚀剂浓度范围,腐蚀速率主要受传质控制。Schimmel^[14]等对比研究了不同蚀刻剂对腐蚀表面形貌的影响,给出了蚀刻表面粗糙度与局部腐蚀速率之间的动力学关系式。John 等^[15]研究了喷射腐蚀方法,并指出腐蚀性能直接与反应器的结构形式有关,且腐蚀过程受传质影响显著,腐蚀表面特征不仅受化学反应速率控制还受传质控制。Lippold 等^[16]分析了腐蚀表面粗糙的形成原因,指出这是由腐蚀过程产生的气体形成气泡

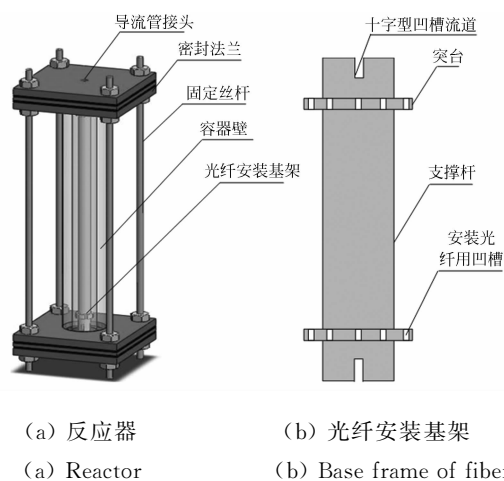
并附着在腐蚀载体表面,阻碍局部腐蚀反应的进行所致。Mackay 等^[17]指出 Si(100)经湿腐蚀后的表面形貌与掺杂成分有关。由此可见,目前关于 SiO₂ 腐蚀的研究虽然很多,但对其机理的研究还存在不足,如何获取光滑的蚀刻光纤表面还有待进一步研究。

为了研究传质和化学反应动力学因素对光纤腐蚀速率及腐蚀后光纤表面粗糙度的影响机理,制备出光滑的蚀刻光纤表面,提高光纤倏逝波传感器的性能,本文设计了用于腐蚀光纤的流动腐蚀反应器,对比研究了光纤物质成分、腐蚀剂温度和流速对光纤腐蚀速率及腐蚀形貌的影响。

2 实验装置与步骤

2.1 反应器

流动腐蚀系统包括腐蚀反应器和流动回路两个部分。流动回路主要由聚四氟乙烯导流管(管外保温层)、防腐型自吸式水泵、恒温水浴组成。腐蚀反应器结构如图 1(a)所示,图中各组件均采用聚四氟乙烯材料,腐蚀容器的内径为 20 mm、外径为 40 mm、长为 300 mm。容器中布置有光纤安装基架,如图 1(b)所示。支撑杆突台上开设



(a) 反应器 (a) Reactor (b) 光纤安装基架 (b) Base frame of fibers

图 1 光纤腐蚀反应器结构示意图

Fig. 1 Configuration of fiber etching reactor

有安装光纤用的凹槽,其开口大小与光纤直径有关,一般在 0.2~2 mm。光纤与凹槽之间采用石蜡粘接。

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 $(125 \pm 1.0) \mu\text{m}$,纤芯直径为 $(62.5 \pm 0.5) \mu\text{m}$ 。光纤包层由 SiO_2 组成,光纤纤芯由 SiO_2 与 GeO_2 组成,且 GeO_2 的含量由外向中心逐渐增加。为获得裸光纤,在室温条件下 (13°C),将 300 mm 光纤的中心区域 150 mm 浸入浓硫酸中,静置 15 min 左右后,去除表面涂敷层。然后用去离子水冲洗 5 min,去除光纤表面的 H^+ 和 SO_4^{2-} 。最后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 酸和蒸馏水配制成质量百分比浓度为 12.5% 的 HF 溶液。

2.3 实验步骤

首先,将制作好的裸光纤固定在光纤安装基架的支撑杆上。然后,将反应器和 HF 酸溶液放入恒温水浴 20 min,使反应器和腐蚀剂温度保持一致。接着,取出反应器,开启自吸水泵,向反应器内通入 HF 酸溶液,启动腐蚀实验。

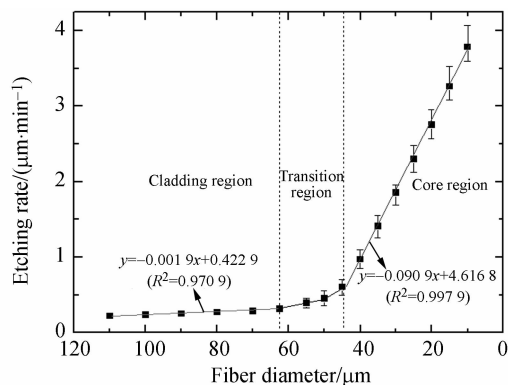
腐蚀结束后立即取出光纤,用去离子水清洗 5 min,并用氮气吹干。腐蚀后的光纤直径采用光学显微镜测量,其精度为 $1 \mu\text{m}$ (SMARTe-320,重庆,中国)。光纤腐蚀速率 (R) 由 $R = dD_F/2d\tau$ 计算,其中 D_F 为光纤直径, τ 为腐蚀时间。光纤表面形貌采用 TESCAN 可变电子真空扫描电子显微镜测量,其精度为 3.0 nm(Czech Republic)。

3 实验结果与讨论

3.1 光纤静态腐蚀过程

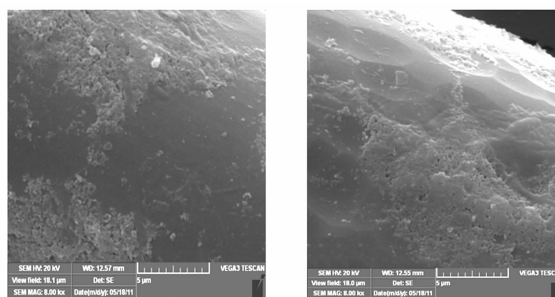
为研究物质成分对光纤腐蚀速率及表面形貌的影响,首先在温度为 40°C 的条件下对光纤进行了静态腐蚀实验(腐蚀剂流速为 0 L/min),光纤包层(SiO_2)和纤芯($\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$)的腐蚀速度随光纤直径的变化如图 2(a)所示,腐蚀后光纤的表面形貌如图 2(b)所示。

由图中可知,光纤包层的腐蚀速率基本维持一定,而光纤纤芯的腐蚀速率远大于光纤包层的腐蚀速率,且随着腐蚀的进行,腐蚀速率线性上



(a) 腐蚀速率与光纤直径关系曲线图 (HF 酸浓度: 12.5%, 温度: 40°C)

(a) Etching rate as a function of fiber diameter (HFA concentration at 12.5%, 40°C)



($D_F = 65 \mu\text{m}$, $R = 0.306 \mu\text{m}/\text{min}$) ($D_F = 30 \mu\text{m}$, $R = 1.855 \mu\text{m}/\text{min}$)

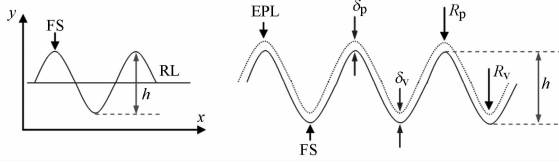
(b) 光纤表面形貌放大 8 000 倍后的 SEM 照片 (HF 酸浓度: 12.5%, 温度: 40°C)

(b) SEM images (8 000 \times) of fiber surfaces etched in HFA at 12.5% (40°C)

图 2 物质成分对腐蚀过程的影响

Fig. 2 Effect of fiber's composition on etching processes

升。这是因为: Si-O 键的溶解键能 ($799 \text{ kJ}/\text{mol}$) 高于 Ge-O 键的溶解键能 ($662 \text{ kJ}/\text{mol}$)^[8], 在相同的腐蚀条件下, 键能越高, 溶解速度越慢。因此, 光纤纤芯的腐蚀速率高于包层的腐蚀速率; 而随着腐蚀在纤芯区域的进行, GeO_2 含量的增加导致腐蚀速率越来越快。需要指出的是, 随着腐蚀速率的加快, 反应生成的大量腐蚀产物和气泡会粘附在光纤表面形成腐蚀产物膜(如图 2(b)所示), 该膜将阻碍腐蚀剂中活性成分与光纤的反应; 而气泡的脱离又将影响到局部腐蚀产物膜的厚度, 改变局部腐蚀剂及产物的传质阻力, 进而影响光纤腐蚀速率和腐蚀表面形貌。因此, 随着腐蚀过程的进行, 光纤表面的凹陷越来越明显(见图 2(b))。



(a) 光纤表面粗糙度示意图 (b) 传质对表面形貌的影响

(a) Schematic diagram (b) Effect of mass-transfer of fiber's surface roughness on fiber's surface morphology

图 3 腐蚀光纤表面粗糙度的形成机理 (FS 表示光纤表面, RL 表示基准线, EPL 表示腐蚀产物层)

Fig. 3 Formation mechanism of etched-fibers' surface roughness (FS: fiber surface, RL: reference line, EPL: etch product layer)

为了解获取光滑腐蚀光纤表面的方法,本文对光纤的腐蚀过程进行了分析。将图 2(b)展示出的粗糙表面简化为图 3。图 3 中, h 表示局部波峰与波谷的高度, δ_p 表示波峰处腐蚀产物的厚度, δ_v 表示波谷处腐蚀产物的厚度, R_p 表示波峰处光纤的腐蚀速率, R_v 表示波谷处光纤的腐蚀速率。从图 3(b)可以看出,蚀刻过程中光纤表面粗糙度直接与波峰处和波谷处的腐蚀速率相关,且高度 h 的变化可表示为光纤波峰处和波谷处腐蚀速率的函数:

$$\frac{dh}{d\tau} = -(R_p - R_v) \quad (1)$$

在光纤腐蚀过程中,腐蚀速率与蚀刻剂中活性物质的传质阻力和反应速率有关。根据唯象理论,光纤波峰处与波谷处的腐蚀速率之间满足^[18]:

$$R_p = \left[\frac{R_{v,i}^m + R_{v,i}^r}{R_{p,i}^m + R_{p,i}^r} \right] R_v \quad (2)$$

式中: $R_{p,i}^m, R_{v,i}^m$ 分别表示腐蚀剂中活性物质 i 在波峰处和波谷处的传质阻力; $R_{p,i}^r, R_{v,i}^r$ 分别表示物质 i 在波峰处和波谷处的化学反应阻力。为分析光纤腐蚀表面粗糙度与化学反应阻力、传质阻力和腐蚀速率间的关系,联立式(1)和式(2)有:

$$\frac{dh}{dt} = \left(1 - \frac{R_{v,i}^m + R_{v,i}^r}{R_{p,i}^m + R_{p,i}^r} \right) R_v \quad (3)$$

由式(3)可知,对任一 $R_v > 0$, 均有: 当 $\left(\frac{R_{v,i}^m + R_{v,i}^r}{R_{p,i}^m + R_{p,i}^r} \right) > 1$ 时, $dh < 0$, 即单纯提高腐蚀速率将增大光纤的粗糙度,只有通过改变波峰与波谷处的传质阻力及化学反应阻力比,才可获得光滑

的腐蚀表面。这也解释了图 2(b)所示的实验结果。

3.2 温度对腐蚀过程的影响

在腐蚀剂浓度恒定时,温度将影响腐蚀剂中活性成分在腐蚀产物膜中的传质阻力^[19],从而影响光纤腐蚀速率。因此,本节分别研究了在腐蚀剂静止和流动(1.25 L/min, Re 约为 2 800)条件下温度对光纤包层腐蚀速率的影响,实验结果如图 4 所示。

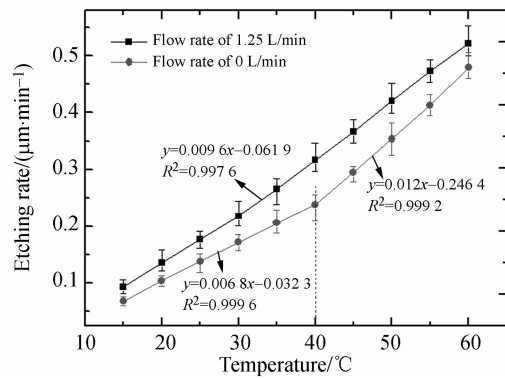


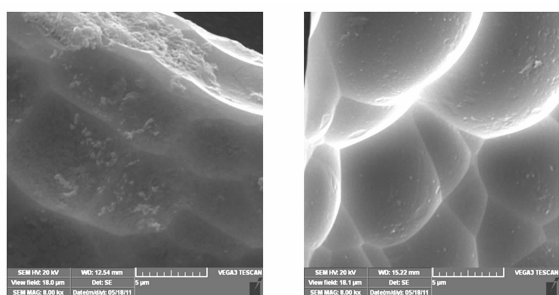
图 4 温度对光纤包层腐蚀速率的影响(HF 酸浓度为 12.5%)

Fig. 4 Effect of temperature on etching rate of fiber cladding (HFA concentration at 12.5%)

由图可知,两种条件下的腐蚀速率均随温度的升高而增大,且腐蚀剂流动条件下的腐蚀速率明显大于静止条件下的腐蚀速率。在静态腐蚀时,以温度 40 °C 为转折点,腐蚀速率与温度呈现出不同的线性变化关系。这是因为在静态腐蚀下,随着化学反应的进行,会有一部份腐蚀产物粘附在光纤表面,这增大了腐蚀剂中活性成分到达光纤表面的传质阻力;而随着温度的升高,腐蚀剂中活性物质的活性增强,在腐蚀产物膜中的扩散速度加快^[20-21],反应速度也相应加快,使得腐蚀速率增大。在本实验条件下,特别是当温度升高到 40 °C 以上时,扩散和反应的强化显著增强,因此高温区域光纤的腐蚀速率增长率高于低温区域光纤的腐蚀速率。在流动腐蚀时,光纤腐蚀速率与温度的线性相关性显著增强,腐蚀速率的转折提前发生在 30 °C,且变化幅度极小。这是因为在温度升高导致扩散和反应加快的基础上,腐蚀剂流动产生的剪切力造成腐蚀产物从光纤表面脱离,进一步有效地降低了传质阻力,从而使腐蚀速率得以提高。但在高温条件下(如 60 °C),光纤的静

态腐蚀速率接近流动腐蚀速率,这说明此时光纤的腐蚀主要受化学反应控制。

当腐蚀温度为 60 °C 时,静态和流动腐蚀条件下光纤腐蚀后的表面形貌如图 5 所示。对比图 2 与图 5 可以看出,腐蚀温度的提高以及腐蚀剂的流动使光纤表面变得更加粗糙。这是因为温度升高虽改善了腐蚀剂中活性物质的传输特性,但波峰与波谷处的传质阻力仍相同,此时腐蚀速率的增大导致腐蚀表面粗糙,特别是在快速流动腐蚀的情况下,这与 3.1 节的分析一致。



(a) 静态腐蚀 (0 L/min) (b) 流动腐蚀 (1.25 L/min)
(a)Static etching (0 L/min) (b)Flow etching (1.25 L/min)

图 5 光纤表面形貌 ($D_F = 30 \mu\text{m}$) 放大 8 000 倍后的 SEM 照片 (HF 酸浓度为 12.5%, 40 °C)

Fig. 5 SEM images (8 000 \times) of etched fiber surfaces ($D_F = 30 \mu\text{m}$) finished in HFA at 12.5% (40 °C)

3.3 流速对腐蚀过程的影响

为进一步探讨腐蚀剂流速对光纤腐蚀速率及腐蚀后表面形貌的影响,分别在 6 种腐蚀剂流速 (0, 0.3, 0.75, 1.25, 1.5, 2.25 L/min) 下进行了流动腐蚀实验,温度为 (40 \pm 1.5) °C,实验结果如图 6 所示。由图可知,光纤包层的腐蚀速率随着腐蚀剂流速的增大而增大。在低流速区 (流速 < 0.75 L/min, 或 $Re < 1\ 800$), 腐蚀剂流速对光纤腐蚀速率的影响显著;在高流速区 (流速 > 1.5 L/min, 或 $Re > 3\ 600$), 腐蚀速率随流速增加而增长的幅度减小,并逐渐趋于稳定。这是因为随着流速的增加,光纤表面粘附的腐蚀产物膜在剪切力的作用下变薄甚至脱落,传质阻力减小,腐蚀速率增大;当流速达到 1.5 L/min 时,腐蚀产物层对腐蚀剂中活性物质的传输阻力可以忽略,此时光纤腐蚀速率将只受化学反应速率控制,因而趋于稳定。

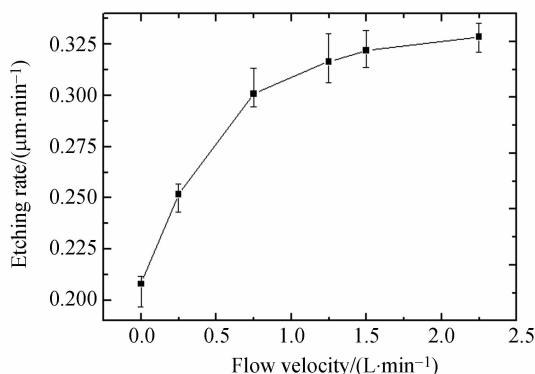
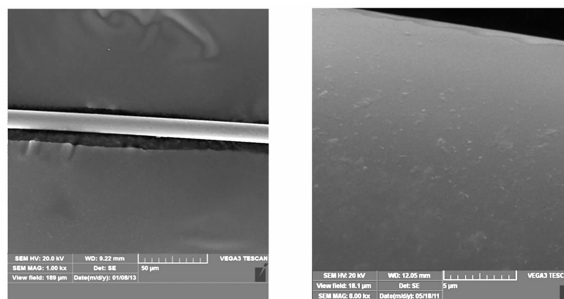


图 6 腐蚀剂流速对光纤腐蚀速率的影响

Fig. 6 Effect of flow rate on fibers' etching rate (HFA concentration at 12.5%, 40 °C)



(a) 放大 1 000 倍后的 SEM 照片 (b) 放大 8 000 倍后的 SEM 照片
(a) At 1 000 \times magnification (b) At 8 000 \times magnification

图 7 光纤表面形貌 ($D_F = 15 \mu\text{m}$) 的 SEM 照片 (0.75 L/min)

Fig. 7 SEM images of etched fiber surfaces ($D_F = 15 \mu\text{m}$) finished in HFA at 12.5% (40 °C, 0.75 L/min)

图 7 显示出了光纤在流速为 0.75 L/min 腐蚀后,直径为 15 μm 的光纤表面形貌的 SEM 显微照片,此时光纤表面光滑。这是因为在低流速下,流速的增加使得波峰处的腐蚀产物层在绕流剪切力的作用下减薄,而波谷处流体扰动较弱,腐蚀产物层厚度的变化较小 (如图 8(b) 所示);因此,波峰与波谷处腐蚀剂中活性物质的传质阻力比发生变化,使得腐蚀后光纤表面的粗糙度得到改善。随着流速的进一步增大,如当流速达到 1.25 L/min 之后,流体扰动加强,波峰与波谷处的腐蚀产物层均被及时分离 (如图 8(c) 所示),传质阻力可以忽略,波峰与波谷处的腐蚀速率只与化学反应速率有关。因此,流速和腐蚀速率的增加会导致腐蚀后光纤表面又变得粗糙 (如图 5(b) 所示)。

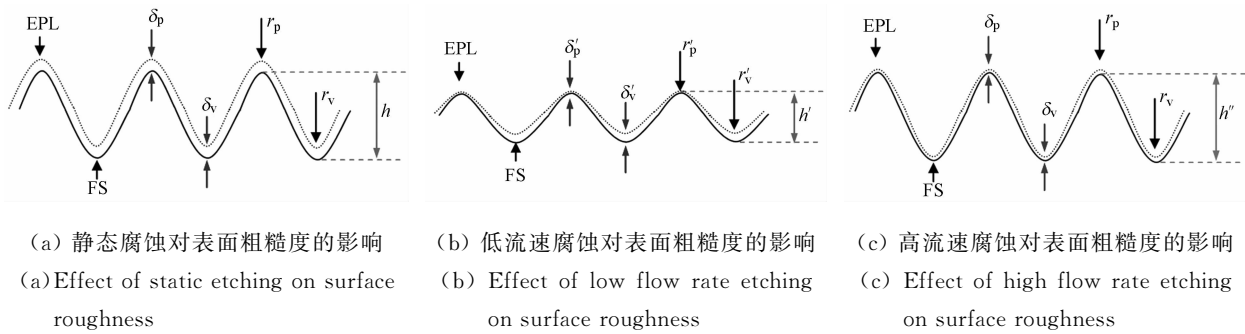


图 8 流速对光纤表面粗糙度影响的物理模型

Fig. 8 Physical models for effects of etchant' flow rate on etched-fibers' surface roughness

4 结 论

本文对光纤组成成分、腐蚀剂温度和流速对腐蚀速率及腐蚀后表面粗糙度的影响进行了研究,从传质和反应动力学角度分析了腐蚀后光纤表面粗糙的原因。实验结果及理论分析表明:光纤腐蚀速率及腐蚀后光纤表面粗糙度受化学反应

速率和传质速率控制。静态腐蚀下,腐蚀速率与温度呈非线性关系,且腐蚀后光纤表面粗糙;升高腐蚀温度,能够增加腐蚀剂中活性成分在腐蚀产物膜中的传质速率,提高腐蚀速率,但很难获得光滑的腐蚀表面。在流动腐蚀下,光纤腐蚀速率得到提高,并与温度呈线性关系,腐蚀后光纤表面的粗糙度呈现出先减小后增大的趋势,在流速为 0.75 L/min 时能获得光滑的腐蚀光纤表面。

参考文献:

- [1] GONÇALVES H M R, DUARTE B A J, ESTEVES da SILVA J C G. Optical fiber sensor for Hg (II) based on carbon dots [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 26:1302-1306.
- [2] PERROTTON C, JAVAHIRALY N, Slaman M, et al.. Fiber optic surface plasmon resonance sensor based on wavelength modulation for hydrogen sensing [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (23): A1175-A1183.
- [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] GONG Y, GUO Y, RAO Y J, et al.. Fiber-optic Fabry-Pérot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22 (23): 1708-1710.
- [5] QUERO G, CRESCITELLI A, PALADINO D, et al.. Evanescent wave long-period fiber grating within D-shaped optical fibers for high sensitivity refractive index detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011,2(152):196-205.
- [6] 钟年丙,廖强,朱恂,等.超声技术在石英光纤腐蚀中的运用 [J]. *光学精密工程*, 2012,20(5): 988-995.
ZHONG N B, LIAO Q, CHEN R, et al.. Application of ultrasonic technology to etching silica optical fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(5): 988-995. (in Chinese)
- [7] CORRES J M, MATIAS I R, BRAVO J, et al.. Tapered optical fiber biosensor for the detection of anti-gliadin antibodies [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008,1(135): 166-171.
- [8] 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, 138:248-260.

- [9] LU P, MEN L Q, CHEN Q Y. Polymer-coated fiber Bragg grating sensors for simultaneous monitoring of soluble analytes and temperature [J]. *Sensors Journal*, IEEE, 2009, 4(9): 340-345.
- [10] GEHRIG S M, KOOPMAN R, NAIM T, *et al.*. Making fast-twitch dystrophic muscles bigger protects them from contraction injury and attenuates the dystrophic pathology [J]. *The American Journal of Pathology*, 2010, 176(1): 29-33.
- [11] ZHONG N B, LIAO Q, WANG Y Z, *et al.*. High-quality fiber fabrication in buffered HF solution with ultrasonic agitation [J]. *Applied Optics*, 2013, 6(52): 1432-1440.
- [12] SCHWARTZ B, ROBBINS H. Chemical etching of silicon 4. etching technology [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1976, 12(123): 1903-1909.
- [13] BARANSKI M, ALBERO J, GORECKI C. A numerical model of wet isotropic etching of silicon molds for microlenses fabrication [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 11(158): D681-D688.
- [14] SCHIMMEL D G. Comparison of chemical etches for revealing (100) silicon crystal defects [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1976, 5(123): 734-741.
- [15] JOHN J P, CDONALD J. Spray etching of silicon in the HNO₃/HF/H₂O system [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, 9(140): 2622-2625.
- [16] LIPPOLD M, PATZIG-KLEIN S, KROKE E. HF-HNO₃-H₂SO₄/H₂O mixtures for etching multicrystalline silicon surfaces: formation of NO₂(+), reaction rates and surface morphologies [J]. *Zeitschrift Fur Naturforschung Section B-A Journal of Chemical Sciences*, 2011, 2(66):155-163.
- [17] MACKAY R E, LIONIS N, LE H R. 3D surface topography and reflectivity of anisotropic etched silicon micromirrors for BioMEMS [J]. *Microsyst Technol.*, 2011, (17): 1763-1770.
- [18] MILIND S K, HENRY F E. Acid-based etching of silicon wafers: mass-transfer and kinetic effects [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, 1(147):176-188.
- [19] LEE M T. Reaction of high-silica optical fibers with hydrofluoric acid [J]. *J. Am. Cer. Soc.*, 1984, 67: C21-C22.
- [20] 李磊,肖泽仪,张志炳,等. 硅橡胶复合膜用于渗透蒸发的膜传质动力学(I)膜面上的对流传质 [J]. *化工学报*, 2002, 11(53):1169-1174.
- LI L, XIAO Z Y, ZHANG ZH B, *et al.*. Mass transfer kinetics of pervaporation by using composite silicone rubber membrane (I): convective transport on membrane surface [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2002, 11(53):1169-1174. (in Chinese)
- [21] OSSEO-ASARE K. Surface chemical processes in chemical mechanical polishing [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2002, 12(149): G651-G655.

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,重庆人,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: wangyzh@cqu.edu.cn



朱 恂(1968—),女,重庆人,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



陈 蓉(1977—),男,福建人,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

导师简介:



廖 强(1965—),男,重庆人,博士,博士生导师,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,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

(版权所有 未经许可 不得转载)

国际强激光与物质相互作用及其应用研讨会征文通知(第一轮)

10月 上海

强激光与物质相互作用的研究一直是科学研究的前沿领域,在该领域所获得的众多研究成果已经或正在转化为现实生产力,使得强激光的应用范围从科学领域不断拓展到工业、国防军事、医学卫生等领域,成为当代新技术的重要支柱。

为促进强激光与物质相互作用领域的技术发展与交流,中国宇航学会光电技术专业委员会和上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室,联合其他相关单位将于10月在上海市举办“国际强激光与物质相互作用及其应用研讨会”。会议组委会将邀请国内外该领域的知名专家和学者到会共同交流,深入探讨强激光与物质相互作用及其应用领域所取得的最新研究成果。

诚挚欢迎国内外相关领域科研院所的科研人员以及大专院校的教师、研究生等踊跃投稿。会议组委会届时将推荐会议论文至国家公开出版的优秀期刊发表。

<http://www.cnoenet.com/2013hpl/> (更多详情,请浏览会议网站)

投稿请登录:www.manuscript-cnoenet.com,中英文兼收。

征文截稿日期:2013年9月10日

主办单位:中国宇航学会、上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室

承办单位:中国宇航学会光电技术专业委员会

联办单位:长春理工大学理学院

支持媒体:《红外与激光工程》(EI收录)、《强激光与粒子束》(EI收录)、《光学精密工程》(EI收录)、中国宇航光电资讯网

征文方向:

- | | |
|----------------|-------------------|
| 1. 激光与物质相互作用 | 6. 高功率激光器 |
| 2. 激光照射的作用及机制 | 7. 非线性光学 |
| 3. 激光等离子体物理及应用 | 8. 激光加工 |
| 4. 强场物理和技术 | 9. 国防领域应用(对抗、隐身等) |
| 5. 激光光谱技术及应用 | 10. 其他应用 |

组委会联系方式:

会议联系:刘艳,邓伟,李瑾(022-58168510)

E-mail: liuyan@cnoenet.com

地址:天津市空港经济区中环西路58号(300308)