

Optical Fiber End Face Processing Technology and Its Development Trend

Bing Chen, Qilin Shu

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning
Email: onetwo1111@qq.com

Received: Feb. 14th, 2016; accepted: Feb. 27th, 2016; published: Mar. 2nd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, the development of optical fiber and the optical fiber end face processing technology are reviewed all over the world. Firstly, the need and course of the development of optical fiber are simply summed up. Then, the analysis is focused on lapping, fused taper, rating carving, chemical corroding, and micro grinding processing of optical fiber, etc. At last, the further trend of optical fiber end face processing technology is discussed.

Keywords

Optical Fiber, Face Processing, Grinding and Polishing, Micro Grinding

光纤端面加工技术及其发展趋势

陈 兵, 舒启林

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳
Email: onetwo1111@qq.com

收稿日期: 2016年2月14日; 录用日期: 2016年2月27日; 发布日期: 2016年3月2日

摘 要

回顾光纤的发展历程及国内外光纤端面加工技术的发展情况, 本文针对国内外光纤的发展的需求、历程,

进行简单归纳。着重对光纤研磨抛光、光纤熔融拉锥、光纤光栅刻写、光纤化学腐蚀以及光纤微磨削加工等光纤端面加工技术进行分析与总结, 并进一步阐述光纤端面加工技术的发展趋势。

关键词

光纤, 端面加工, 研磨抛光, 微磨削

1. 引言

随着光信息时代的到来, 光纤通讯与光纤传感领域已经成为二十一世纪全世界研究的热点, 加快了光纤通信技术的飞速发展[1]。为了满足人们对通信技术的要求, 需要开发出超低损耗、长波的新型光纤结构和优质的加工工艺。而光纤端面的形状是影响光纤耦合质量的主要因素, 进而促使人们不断的对光纤端面加工技术进行研究[2]。图 1 是人们对光纤需求的发展趋势。

自从 1966 年高锟博士[3] (2009 年诺贝尔物理学奖获得者)提出了光纤通信新设想后, 光纤通信技术及光纤端面加工技术获得了快速发展。1970 年 Snyder [4]和 Wijngaard [5]成功研制出低损耗光纤。1975 年 Yamamoto 和他的团队通过化学腐蚀方法成功的研制出锥形光纤。1978 年, 加拿大光学通讯研究所的 Kennen O. Hill [6]和他的同事们在研究掺铒光纤非线性的实验中偶然发现了光纤的光敏性, 并且发现沿光的传播方向上的折射率周期性变化。通过不断的实验, 提出了光纤光栅刻写微加工的方法, 为光纤光栅刻写技术奠定了基础。1980 年 R. A. Bergh [7]第一次进行光纤端面抛磨研究, 之后 Wrong [8]等提出了一种化学腐蚀方法, 用来制造扫描光学显微镜中的探针尖端。Hung [9]用类似的方法在光纤端面制成了微型透镜 Samuel [10]用四轴微型研磨抛光机加工出了理想几何形状的光纤端面。

2. 端面加工技术的主要方法

普通光纤的基本结构如图 2 是内层为纤芯、外层为包层的双层圆柱状媒介; 纤芯的折射率大于包层的折射率, 当入射角满足全内反射条件时, 入射光按照光波导理论沿着纤芯向前传播。光纤加工技术是指改变光纤纤芯或包层折射率分布、光纤端面以及实现功能化等的微加工技术。目前常用加工光纤端面的方法有研磨抛光、熔融拉锥、光栅刻写、化学腐蚀以及光纤的微磨削加工, 通过以上方法可以加工出理想的几何光纤端面。下文将着重对以上五种方法进行归纳。

2.1. 光纤研磨抛光

研磨抛光微加工主要是指通过固定夹持裸光纤, 并实现光纤与研磨砂纸之间相对位置的控制, 以及摩擦获得各种锥角的光纤。光纤的研磨抛光主要有两个方面: 端面研磨抛光以及侧面研磨抛光。端面研磨抛光通过研磨裸光纤制作各种光纤斜面、楔面、以及锥面, 主要用来提高相连器件耦合效率的光纤活动链接器、波导耦合器等[11]。光纤侧面抛磨就是在普通通信光纤上, 利用光学加工技术, 在一段长度上将圆柱形光纤包层抛磨掉一部分所制成的光纤, 其中包层抛磨过的那段光纤的横截面与大写字母 D 相似(如图 3), 而在未抛磨过的光纤段还是圆柱形, 在抛磨段填充不同材料, 从而改变折射率, 利用此种方法可以制作各种光纤器件[12]。常见的端面抛磨光纤形状如图 4 所示。

目前光纤的研磨抛光已经相对比较成熟完善, 角度控制以及研磨平整度等都能达到相当精确的程度。在国外, 以日本精工电子和美国 ULTRA TEC 等公司为例, 已经形成了一套从研磨抛光到测量的可实用化的光纤研磨机。在国内, 暨南大学的陈哲等、哈尔滨工程大学的苑立波研究团队等通过进行光纤抛磨方面的研究, 也已申请了相关国家专利并设计制造了光纤抛磨装置。然而目前光纤在研磨制备的过程中,

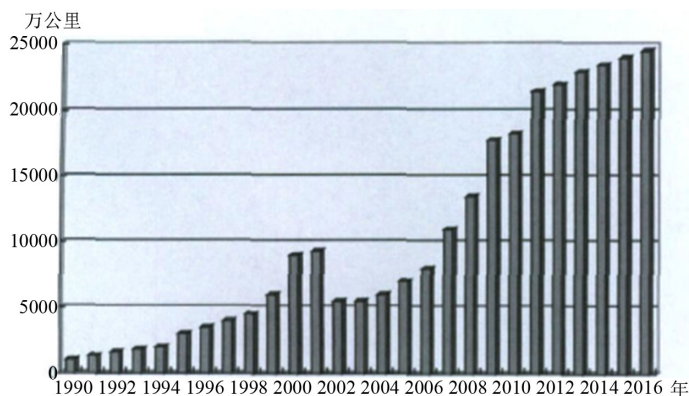


Figure 1. The global demand of optical fiber

图 1. 全球光纤需求量



Figure 2. The basic structure of optical fiber

图 2. 光纤的基本结构



Figure 3. Profile grinding cross section

图 3. 侧面抛磨横截面

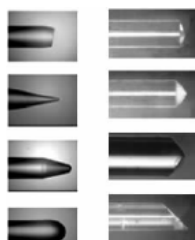


Figure 4. The common face grinding optical fiber

图 4. 常见的端面抛磨光纤

存在过程比较复杂, 同时成本也比较高, 成品率很低的主要问题。此外在研磨光纤时, 光纤非常细, 且是悬臂梁结构。因此、在实际加工过程中, 光纤在外加位移载荷的作用下会产生弯曲变形, 加工端面会因光纤的弯曲变形而产生一定的偏转角 H , 光纤端面尖端会翘起, 不能与抛光垫接触。因此必须对偏转角进行补偿, 从而尽量实现光纤端面与研磨纸是完全接触, 使光纤端面之间的压强尽量分布均匀。可是、在研磨光纤时, 除了光纤的变形还存在很多其他因素。比如光纤夹持伸出长度 L 和抛光垫弹性模量 E_2 不仅影响到光纤透镜抛光接触区域的接触形式, 也同时影响接触压强的分布状态; 外加位移载荷 z 对接触形式影响不大, 但对接触压强分布影响较大。而目前社会对光纤的需求量却不断增加, 因此很难满足

社会需求[13]。

2.2. 光纤熔融拉锥

光纤熔融拉锥主要是指将单根或多根去除外层包层的光纤,按照一定的方法排布在火焰二氧化碳激光器或者加热电弧等高温作用下拉伸光纤,最终在加热光纤的部分拉制出双锥体结构后,在最细的部分切断获得光纤锥体的方法,可以通过控制放电强度、放电时间以及马达转速等获得不同直径、锥角的光纤端面。拉锥后的光纤其光纤纤芯和包层的折射率都不变,只改变光纤的直径大小,使光纤变成一种不均匀的光波导[14]。然而,光纤熔融拉锥技术,根据光纤的总类不同,其加工过程的控制难易程度也不一样。对于普通光纤熔融拉锥时,只要满足过度区域足够长,即过度区域光纤的形状满足渐变条件时,拉锥后的光纤损耗会非常小。而对于目前一些特殊的光纤(如光子晶体光纤[15])在利用熔融拉锥加工方法时,由于空气孔的表面张力将使空气孔塌缩,因此光子晶体光纤的熔融拉锥会发生两种变形[16]:一是光子晶体光纤的空气孔直径和孔间距同时变小,但是空气孔直径与孔间距两者之比会保值不变。二是光子晶体光纤空气孔塌缩变小截面积基本不变。在光子晶体光纤的拉锥过程中为了实现第一种拉锥效果即尽量保持空气孔直径与孔间距不变的情况下使纤芯变细。目前国外常常采用快速低温拉锥方法[17]。在国内光纤熔融拉锥也得到了快速发展,目前根据光纤熔融拉锥而发展起来的一门新的技术就是微纳米制造。2003年我国童利民[18]教授研究团队,通过两步拉伸方法制备出外形非常均匀的亚微米和纳米直径氧化硅线,其表面光滑至艾量级,最小直径为 50 nm,并成功地应用这些比光波长更细的微纳光纤进行了低损耗光传输实验,引领了微纳光纤方面的研究工作。光纤熔融拉锥技术是重要的后处理技术之一,常用此方法来制造光纤耦合器、波分复用器、合束器等。但是在光纤拉锥过程中会存在锥角的控制等问题。通过减小锥腰直径可以提高偏振器的消光比,但当锥腰光纤直径过小时,虽然偏振器的消光比很高,但偏振器在经受外界振动冲击和温度冲击时,容易出现由于内应力不匹配而导致锥腰光纤断裂的问题。其次,光纤在拉伸过程中光纤的两端拉力突然变化的问题,也会影响光纤的加工精度。当弹簧的伸长不相同,光纤受到的拉力也不同,因此需要灵敏度特别高的传感器。才能实现拉伸过程中的拉力控制。此外、由于拉锥过程中必须保证光纤的拉伸速度以及湿度场的稳定才能确保光纤器件性能的一致性。

2.3. 光纤光栅刻写

光纤光栅刻写加工技术:光纤光刻微加工技术是制作光纤端面透镜重要的方法。是指通过光和光刻胶的相互作用,获得光刻胶材质的微透镜或者以光刻胶透镜为磨具,经溅射、刻蚀等后续工艺获得石英材质的端面透镜的方法。目前,光纤光栅刻写中常用到的方法有:二氧化碳激光器、聚焦离子束、飞秒激光器。所谓二氧化碳激光器光纤光栅刻写方法的实质是通过灼烧导致光纤形貌上的折射率分布,光栅周期的大小受到激光器光斑大小的限制,所以一般只能被用来刻写 LPG。目前我国饶云江等人[19]通过使用二氧化碳激光器在光纤的一侧烧蚀周期性的凹槽制备了 LPG,并进行了应力测量应用研究。聚焦离子束光纤光栅刻写方法是指将液态金属(Ga)离子源产生的离子束经过离子枪加速,对表面原子进行剥离完成微、纳米级表面形貌加工的技术。童利民教授等人利用光纤光栅刻写技术在直径小于 2 μm 的二氧化硅微纳光纤上通过周期性的刻性 100 nm 深的凹槽,制作了微纳光纤布拉格光栅。飞秒激光器光纤光栅刻写方法是利用飞秒激光以脉冲形式运转的激光,持续时间非常短。由于在阈值附近有确定性的光分解和损伤,以及可控的材料切除,飞秒激光成为微机械加工的理想工具,也成为刻写 FBG 的可选技术。Wang 等人在熔融拉锥制作的微纳光纤上用飞秒激光刻写出了 FBG,并对光栅模式与光栅直径、外界折射率的关系进行了研究,直径为 2 μm 的 FBG 在折射率 1.44 附近的灵敏度为 231.4 nm/R.I.U。尽管光纤光栅刻写方法很多,但是每种方法各有优劣。如二氧化碳激光器光纤光栅刻写方法由于灼烧导致的物理损伤,

这样使得光栅机械性能受到很大影响。而聚焦离子束刻写以及飞秒激光微加工虽然可以获得折射率高对比度好的光栅结构, 对于较短长度的光栅依然具有较高的信号强度。但是这只是针对小型化的全光传感器研究。因为其制造成本很大, 不适合大批量的生产。

2.4. 光纤化学腐蚀

光纤的腐蚀制作透镜的方法主要是通过调节光纤和腐蚀性溶液的作用时间、加热溶液的温度、腐蚀液的流速以及将光纤浸入溶液的深度等制作不同形状、尺寸的光纤端面。因为普通光纤的主要成分是 SiO_2 , 而 HF 酸溶液能够与 SiO_2 发生化学反应[20] [21]。当我们在 HF 溶液中加入诸如异辛院、甲苯、葵花油等不溶于水的液体混合时, 在两种液体的交界面就会形成液体弯月面, 光纤与液体弯月面交界的部分随着腐蚀过程而不断变化[22]。由于反应过程中底部的 HF 浓度大于弯月面顶部的 HF 浓度, 最终在光纤的端面形成一个微米量级的锥型。该方法成本低, 不需要专业技术很深的人员操作, 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。但是 Lippold [23]等分析了腐蚀表面粗糙的形成原因, 指出这是由于腐蚀过程中产生的气体形成了汽包, 并附着在腐蚀载体的表面, 阻碍局部腐蚀反应的进行所致。Mackay [24]等研究团队实验发现二氧化硅经过腐蚀后的表面与表面的参杂成分含量有关。由此可见, 目前关于二氧化硅腐蚀如何获取光滑的腐蚀表面有待进一步研究。Mario Dagenais [25]等人利用 HF 溶液腐蚀, 获得不同直径的微纳布拉格光纤光栅, 并用来测量外界溶液的折射率, 其最大灵敏度得到了很大的提高。其后, Dai 的研究团队, 利用相同的制备方法获得了 8.5 um 直径的微纳布拉格光纤光栅, 并测量了含有 Fe304 微粒的溶液在控制电极改变下的磁场变化, 当磁场增加 25 mT 时, 微纳布拉格光纤光栅波长漂移了 86 pm 。由此可知, 光纤传感器件的化学腐蚀可以提高其传感器的灵敏度, 而且具有批量生产的能力。但是光纤的化学腐蚀与腐蚀剂温度和流速对腐蚀速率也有很大的关系。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, 从而影响光纤腐蚀速率。实验表明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。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反应速度也相应加快, 使得腐蚀速率增大。此外, 腐蚀剂的流速对光纤腐蚀研究表明: 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, 腐蚀剂流速对光纤腐蚀速率的影响显著。在高流速区, 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, 当流速达到一定程度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。由此可见, 不加控制的化学腐蚀工艺, 会致使光纤腐蚀的损耗大大的增加, 严重影响光纤器件的应用[26]。

2.5. 光纤微磨削加工

光纤微磨削加工主要是指通过固定夹持裸光纤, 并实现光纤与砂轮(微磨棒)之间相对位置的控制, 通过磨削来获得各种锥角的光纤。最近几年来, 随着集成电路和微机电系统的推广, 使得超精密微磨床技术也得到了很快的发展, 对于结构比较复杂的三维微小零件的加工, 更适宜用超精密微磨床加工。国内外一些学者已经实现了用微机械加工技术对多种材料进行加工, 能够获得纳米级粗糙度的良好效果。光纤微磨削加工使用的桌面化微磨床如图 5 所示。

通过光纤夹具夹持裸光纤, 采用直径小于 1 mm 的微磨棒, 进行磨削光纤。使用此种方法在加工光纤端面透镜的过程中, 光纤端面与微磨棒处于完全接触状态[27], 相比光纤的研磨抛光有所改善。然而,

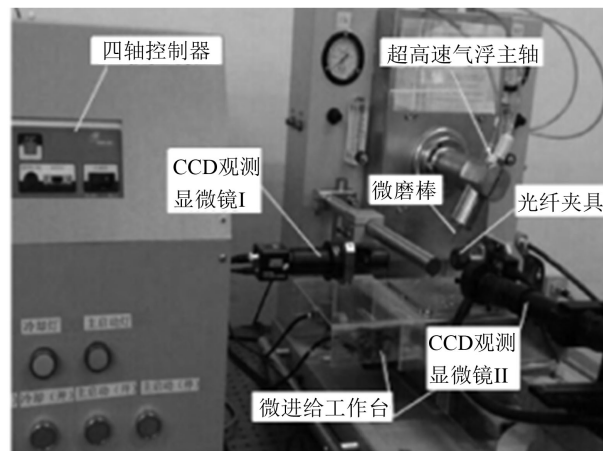


Figure 5. Desktop micro grinding machine

图 5. 桌面化微磨床

哈尔滨工业大学的孙雅洲教授和郑青竹[28]对微磨削过程中的磨削力和切削厚度建立了预测模型,并通过试验进行了验证。另外,又对微磨光纤材料的去除形式以及微磨削刀具的磨损变形问题展开了研究,结果发现,微磨削刀具在实际加工中极易磨损,而且磨损对工件表面质量造成的影响比较大。由此可知,微磨棒在实际加工中磨损太快从而限制了微磨削技术的发展,所以国外对微磨削领域的早期研究主要集中在微磨削刀具和微型机床的制作上[29]。此外,由于光纤直径非常小,通过夹具夹持时,光纤可以当做悬臂梁来处理,当微磨棒进行磨削时,光纤会发生歪曲变形,从而影响光纤端面的形状。目前国外常采用气浮的方法来补偿光纤变形,通过给光纤一个向上的作用力,从而达到角度的补偿。

3. 光纤加工技术的发展趋势

目前光纤端面加工的理论和制作技术已经得到很好研究,但是伴随着如光子晶体光纤、光热光纤等新型光纤的出现以及特殊封装和超高灵敏度等应用要求的提出,基于新型光纤端面器件的微加工技术和应用仍处于迅速发展阶段[30]。目前光纤端面微加工领域的研究热点主要有:光纤端面加工微纳技术、填充微纳加工技术,以及飞秒激光器微纳加工技术。光纤端面加工微纳技术就是利用光纤端面研磨抛光技术、光纤端面拉锥加工技术、光纤端面化学腐蚀微加工技术,以及光纤表面光刻微加工及相关技术,进行各种纳米级光纤端面的制作。填充微纳加工技术就是指光子晶体光纤的包层沿轴方向均匀排列着空气孔,因此孔内可以填充气体、液体、金属纳米颗粒、液晶等材料。当这些填充物质的光学性质随外界的物理参量发生变化时,光子晶体光纤的透射光强或透射光谱也会随之发生变化。依据局部表面等离子体共振效应(LSPR)、表面增强拉曼效应(SERS)以及包层倏逝波等现象,我们可以利用光谱法或折射法分析填充上述材料后光子晶体光纤的光学性质(如折射率、吸收)[31]。飞秒激光器微纳加工技术以其超短脉宽和超强功率的特点,在光纤微纳结构制造上能够满足其跨尺度、高精度、高性能和多样性的加工要求。飞秒激光制作传统均匀和非均匀 FBG 的同时,利用逐点刻写技术的灵活性设计和制作了具有特殊结构、新颖光谱特性的高局域化 FBG,这拓展了光纤光栅的功能性。Fs-FBG 不仅能够用于苛刻环境传感,亦在高功率和多波长光纤激光器领域展现了广阔的应用前景和商业价值[32]。

4. 总结

尽管光纤端面加工技术得到了很大的发展,但是由于光纤直径小,在加工时很容易发生变形,从而影响光纤端面的形状,而光纤端面的形状是影响光纤耦合的重要因。而对于光纤的研磨抛光、熔融拉锥、

光栅刻写、化学腐蚀等方法各有优劣, 都不能达到完美的状况, 且人们对光纤的需求量却不断增加, 对于传统的端面加工受制由于其高成本、低产量、低效率的影响。人们应当寻找大面积制备微纳米结构的技术, 并实现光纤端面的器件化, 以满足社会对光纤的需求量日益增加, 对光纤端面器件的规模应用显得十分重要。

参考文献 (References)

- [1] 黄本华. 光纤发展趋势及最新技术探讨[J]. 现代传输, 2013(1): 62-64.
- [2] 吕璠. 光纤通信的发展趋势及应用[J]. 科技信息, 2009(23): I0039-I0040.
- [3] Kao, K.C. and Hockham, G.A. (1966) Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers-London*, **113**, 1151-1158. <http://dx.doi.org/10.1049/ptee.1966.0189>
- [4] Snyder, A.W. (1972) Coupled-Mode Theory for Optical Fibers. *Journal of the Optical Society of America*, **62**, 1267-1277. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.62.001267>
- [5] Wijngaard, W. (1973) Guided Normal Modes of Two Parallel Circular Dielectric Rods. *Journal of the Optical Society of America*, **63**, 944-950. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.63.000944>
- [6] Hill, K.O., Fuji, Y., Johnson, D.C. and Kawasaki, B.S. (1978) Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides—Application to Reflection Filter Fabrication. *Applied Physics Letters*, **32**, 647. <http://dx.doi.org/10.1063/1.89881>
- [7] Bergh, R.A., Kotler, G. and Shaw, H.J. (1980) Single-Mode Fiber Optic Directional Coupler. *IEEE Electronics Letters*, **16**, 260-261. <http://dx.doi.org/10.1049/el:19800191>
- [8] Wong, P., Wang, T. and Ho, C. (2002) Optical Fiber tip Fabricated by Surface Tension Controlled Etching. *Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop*, **6**, 94-100.
- [9] Huang, H., Chen, W.K. and Yin, L. (2004) Micro/Meso Ultra Precision Grinding of Fiber Optical Connectors. *Precision Engineering*, **28**, 95-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2003.08.001>
- [10] Kapron, F.P., Keck, D.B. and Maurer, R.D. (1970) Radiation Losses in Glass Optical Waveguides. *Applied Physics Letters*, **17**, 423. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1653255>
- [11] 白银冰. 光纤微加工技术及器件应用研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] 陈哲, 沈丽达, 江沛凡, 刘林和. 光纤侧边抛磨装置及其工艺方法[P]. 中国专利, CN1631616A, 2005-06-29.
- [13] 刘德福, 段吉安, 钟掘. 光纤端面研磨加工的表面质量[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 187-191.
- [14] 帅希士. 电加热式熔融拉锥机的运动控制研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [15] 武延荣, 郭丽霞, 薛文瑞, 周国生. 单偏振光子晶体光纤[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 593-597.
- [16] 方宏, 姜淑琴, 任国斌, 郭铁英, 简水生. 非均匀孔径光子晶体光纤的模式截止[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 493-498.
- [17] Wadsworth, W.J., Witkowska, A., Leon-Saval, S. and Birks, T. (2005) Hole Inflation and Tapering of Stock Photonic Crystal Fibres. *Optics Express*, **13**, 6541-6549. <http://dx.doi.org/10.1364/OPEX.13.006541>
- [18] Tong, L., Gattass, R.R., Ashtcom, J.B., He, S., Lou, J., Shen, M., Maxwell, I. and Mazur, E. (2003) Subwavelength Diameter Silica Wires for Low-Loss Optical Wave Guiding. *Nature*, **426**, 816-819. <http://dx.doi.org/10.1038/nature02193>
- [19] Wang, Y.-P., Wang, D.N., Jin, W., Rao, Y.-J. and Peng, G.-D. (2006) Asymmetric Long Period Fiber Gratings Fabricated by Use of Laser to Carve Periodic Grooves on the Optical Fiber. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 151105.
- [20] Corres, J.M., Matias, I.R., Bravo, J. and Arregui, F.J. (2008) Tapered Optical Fiber Biosensor for the Detection of Anti-Gliadin Antibodies. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **135**, 166-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2008.08.008>
- [21] Fang, X., Liao, C.R. and Wang, D.N. (2010) Femtosecond Laser Fabricated Fiber Bragg Grating in Microfiber for Refractive Index Sensing. *Optical Letters*, **35**, 1007-1009. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.35.001007>
- [22] Hoffmann, P., Dutoit, B. and Salathé, R.-P. (1995) Comparison of Mechanically Drawn and Protection Layer Chemically Etched Optical Fiber Tips. *Ultramicroscopy*, **61**, 165-170. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3991\(95\)00122-0](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3991(95)00122-0)
- [23] Lippold, M., Patzig-Klein, S. and Kroke, E. (2011) HF-HNO₃-H₂SO₄/H₂O Mixtures for Etching Multicrystalline Silicon Surfaces Formation of NO₂⁺ Reaction Rates and Surface Morphologies. *Zeitschrift für Naturforschung B*, **66**, 155-163. <http://dx.doi.org/10.5560/ZNB.2011.66b0155>
- [24] Milind, S.K. and Henry, F.E. (2000) Acid-Based Etching of Silicon Wafers: Mass-Transfer and Kinetic Effects. *Journal of the Electrochemical Society*, **147**, 176-188. <http://dx.doi.org/10.1149/1.1393172>

- [25] Chryssis, A.N., Lee, S.M., Lee, S.B., Saini, S.S. and Dagenais, M. (2005) High Sensitivity Evanescent Field Fiber Bragg Grating Sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 1253-1255.
<http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2005.846953>
- [26] 钟年丙, 王永忠, 廖强, 朱恂, 陈蓉. 流动腐蚀方式对石英光纤湿腐蚀特性的影响[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 1966-1973.
- [27] 吕玉山, 王运江, 于湖平. 斜面 60 度光纤透镜抛光接触状态的分析[J]. 工具技术, 2010, 44(8): 91-96.
- [28] 郑青竹. 微细磨削性能及微径砂轮磨损试验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [29] 吴晓芳, 吕玉山, 舒启林. 光纤端面透镜微磨削加工试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2): 144-147.
- [30] 高然, 江毅. 微纳加工技术下光纤传感器的研究及应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [31] Alwis, L., Sun, T. and Grattan, K.T.V. (2013) Fibre Optic Long Period Grating Based Humidity Sensor Probe Using a Michelson Interferometric Arrangement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **178**, 694-699.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2012.11.062>
- [32] 陈超. 耐高温光纤光栅的飞秒激光制备及应用研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.