

文章编号: 1001-3806(2018)01-0011-08

聚合物光纤光栅制备进展

褚状状^{1,2}, 游利兵^{1*}, 王庆胜¹, 尹广玥^{1,2}, 陈亮^{1,2}, 方晓东^{1,2}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 安徽省光子器件与材料重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: 聚合物光纤光栅不仅具有体积小、质量轻、柔软、成本低等诸多优点, 还因聚合物自身的特性而具有灵敏度高、响应范围宽、生物相容性等优良特性。首先梳理了聚合物光纤的光敏性机理, 概述了聚合物光纤光栅制备的刻蚀光源和方法; 其次根据聚合物光纤的组成材料, 概述了多种聚合物光纤光栅的制备进展和性能指标, 包括聚甲基丙烯酸甲酯、环烯烃共聚物 TOPAS、透明无定形氟聚合物 CYTOP 和聚碳酸酯。总之, 目前聚甲基丙烯酸甲酯聚合物光纤光栅的研究占主导, 而基于新型材料的聚合物光纤光栅因自身独特的优势也逐渐受到重视。

关键词: 光栅; 聚合物光纤; 光敏机制; 光纤布喇格光栅; 长周期光栅

中图分类号: TN253; TN929.11 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.003

Progress in fabrication of polymer optical fiber gratings

CHU Zhuangzhuang^{1,2}, YOU Libing¹, WANG Qingsheng¹, YIN Guangyue^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, FANG Xiaodong^{1,2}

(1. Anhui Province Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Polymer fiber gratings have many advantages, such as small size, light weight, softness and low cost. Due to the characteristics of polymer itself, it also has high sensitivity, wide response range and good biocompatibility. Firstly, the photosensitivity mechanism of polymer optical fiber was studied, and the etched light source and method for preparing polymer fiber gratings were summarized. Secondly, according to the composition material of polymer optical fiber, the progress in preparation and the performance of polymer fiber gratings, including polymethyl methacrylate, TOPAS, CYTOP and polycarbonate were overviewed. At present, the study on polymethyl methacrylate polymer fiber gratings is dominant. Polymer fiber gratings based on new materials have been paid more and more attention due to their unique advantages.

Key words: gratings; polymer optical fibers; photosensitive mechanism; optical fiber Bragg grating; long period grating

引言

自 HILL 等人首次发现掺锗石英光纤的光敏性并制备了第 1 支光纤布喇格光栅 (fiber Bragg gratings, FBG) 以来, 光纤光栅已逐渐成为必不可少的光纤无源器件^[1]。光纤光栅不仅具有体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、可遥测和可复用等诸多优点^[2], 还因其独特的波长选择性被广泛应用于光纤通信和传感领域。在光纤通信领域, 光纤光栅可用于色散补偿、光学滤波、光分插复用、光纤激光器或半导体激光器的调谐和稳频、掺铒光纤放大器的增益平坦等; 在光纤传感领域, 光纤光栅可用于诸多参量的监测, 如温度、应力、压

力、应变和水分等^[3]。

聚合物光纤 (polymer optical fibers, POF) 具有低成本、易处理等优点, 不仅在短距离通信领域有巨大潜力, 而且还可用于制备光学器件, 如聚合物光纤布喇格光栅 (polymer optical fiber Bragg gratings, POFBG) 和长周期光栅 (long period gratings, LPG) 等。与石英光纤光栅相比, 聚合物光纤光栅不仅具有柔软、易弯、质轻、生物相容性等优点, 而且因聚合物的低杨氏模量而具有灵敏度高、响应范围宽等优良特性^[4]。第 1 支聚合物光纤布喇格光栅早在 1999 年就已问世^[5], 随后各种不同类型的聚合物光纤光栅也相继被报道出来, 但商业化的光纤光栅传感器还是基于石英光纤光栅。聚合物光纤的材料通常以聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 为主, 近年来基于新型材料的聚合物光纤及其光栅的制备也相继被报道出来, 如环烯烃共聚物 TOPAS、透明无定形氟聚合物 CYTOP、聚碳酸酯 (polycarbonate, PC) 和聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 等^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (61205138)

作者简介: 褚状状 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅制备及传感技术等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lbyou@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2017-03-01; 收到修改稿日期: 2017-04-13

1 光敏性机制

光纤的光敏性主要是光纤的光致折射率变化。掺锗石英光纤的紫外诱导折射率变化机理有色心模型^[6]和致密化^[7]两种。此外,高温高压载氢可以提高掺锗石英光纤的光敏性,增加最大折射率变化量^[8]。而聚合物光纤的光致折射率变化机理有多种,如光致异构化^[9]、致密化^[10]和光化学反应^[11]等。

1.1 光解作用

193nm 和 248nm 紫外激光辐照引起的 PMMA 光解过程如图 1 所示^[12]。不同大小的辐照能量会引起不同的化学过程,导致不同数量的侧链分裂或主链断裂^[13-14]。248nm 紫外激光的能量密度低于 15mJ/cm² 时,PMMA 的侧链完全断裂,能量密度为 30mJ/cm² 时,PMMA 的主链断裂;而相同条件下的 193nm 紫外激光只能使 PMMA 的部分侧链断裂^[12]。主链或侧链的断裂会导致聚合物材料的密度变化,从而引起折射率的变化^[12,15-20]。

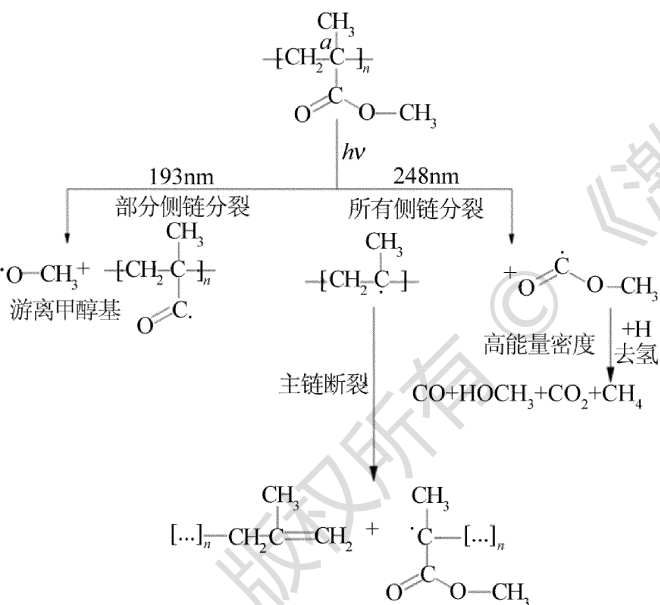


图 1 PMMA 光解简化过程^[12]

基于光解机制可在不掺杂的聚合物光纤中制备光栅,而不需要特制的光纤。然而,掺杂的好处之一是可以选择合适波长的激光器。此外,波长小于 350nm 的紫外激光对于 PMMA 聚合物的穿透深度非常低,因而激光能否到达纤芯还取决于光纤的几何形状和尺寸^[21-22]。

1.2 光聚合反应

在聚合物光纤制备过程中,通过调节引发剂和链转移剂的含量可以控制残余单体分子的含量^[5],而残余单体的光聚合会引起光纤的局部密度变化,从而产生光致折射率结构。已有报道称含有残余单体的纯

PMMA 具有光敏性^[19],且在含单体的聚合物光纤中制备 POFBG 也已有报道^[5,23-24]。然而,对光聚合机理而言,残余单体含量少的 PMMA 光纤的光敏性可能很弱甚至没有光敏性^[24]。此外,含残余单体的聚合物光纤的长期稳定性和均匀性也较差。

1.3 光交联反应

聚合物光纤功能性侧链的激活可以诱导交联反应,从而导致光纤密度的增加。PMMA 氧化处理生成的主链中的氧化物基团可以作为交联引发剂,在激光辐照作用下引起密度的增加。1970 年,TOMLINSON 等人采用 325nm 和 365nm 紫外激光辐照氧化的 PMMA,折射率增加量高达 3×10^{-3} ^[17]。

1.4 光致异构化

如果不同的异构体态具有不同的折射率,且激光辐照可以诱导不同异构体态之间的转化,则掺杂异构体的聚合物光纤具有光敏性。4-stilbenemethanol 是一种典型的异构体,可在 325nm 激光辐照下从高折射率态向低折射率态转变,如图 2 所示。YU 等人采用光致异构化机理在聚合物光纤中制备了 FBG^[9]。然而,采用该机制制备光纤光栅需要特定的聚合物光纤,因而增加了光纤的制备难度和成本。

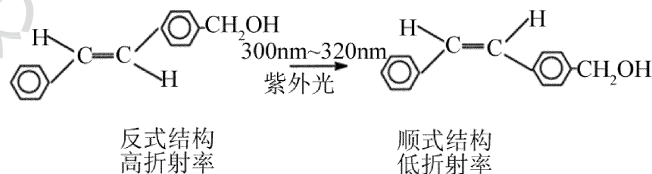


图 2 紫外激光诱导 4-stilbenemethanol 的异构化^[9]

1.5 飞秒激光诱导的光敏性

聚焦飞秒激光的能量密度高,聚合物光纤因多光子电离吸收而导致光纤结构产生永久性变化。飞秒激光制备聚合物光纤光栅的机理包括致密化和光解作用,聚焦光束使材料局部熔化,再凝聚的不均匀性导致密度的变化^[25]。此外,BAUM 等人对高能量密度的飞秒激光诱导 PMMA 光解进行了研究^[26]。纯 PMMA 平板中光栅的最大折射率调制为 $5 \pm 0.5 \times 10^{-4}$ ^[27],BAUM 等人采用飞秒激光在单模聚合物光纤中制备了折射率结构^[26]。

2 制备聚合物光纤光栅的激光器和方法

已报道的制备聚合物光纤光栅的激光器有很多种,如二倍频光参量振荡(optical parametric oscillation, OPO)激光器^[5,28]、钛蓝宝石飞秒激光器^[29]、连续 HeCd 激光器^[30-36]、KrF 准分子激光器^[37-39]、CO₂ 激光器^[40]和三倍频 Nd:YAG 激光^[41]等,表 1 中列出了它们之间的比较。不论是 PMMA, TOPAS, CYTOP 和 PC 聚合物光

纤布喇格光栅,还是渐变折射率、梯度折射率和微结构聚合物光纤布喇格光栅的制备,大量的文献中以 325nm 连续 HeCd 激光器作为刻蚀光源,而石英光纤光栅批量生产采用的 248nm KrF 准分子激光器于 2015 年才首次成功用于 PMMA 聚合物光纤布喇格光栅的制备。

和石英光纤光栅的制备类似,聚合物光纤布喇格光栅的制备以相位掩模法^[29-30,33-35,37-39]为主,也有改进

的相位掩模法^[5,30,41]和扫描相位掩模法^[33,36],而聚合物长周期光纤光栅的制备以逐点写入法^[40,42-44]为主。

表 1 中,mPOFBG 为微结构聚合物光纤布喇格光栅 (microstructured polymer optical fiber Bragg gratings);TFBG 为倾斜光纤布喇格光栅 (tilted fiber Bragg gratings);mPOF 为微结构聚合物光纤 (microstructured polymer optical fibers)。

表 1 聚合物光纤光栅制备的激光器

激光器	波长	功率(密度)	光纤光栅类型	制备时间/反射率	参考文献
二倍频 OPO	325nm	—	PMMA POFBG	—/80%	[5]
二倍频 OPO	325nm	—	PMMA POFBG	—/28dB	[28]
钛蓝宝石激光放大器	800nm,120fs	—	多模 POFBG	—	[29]
HeCd	325nm	30mW	PMMA mPOFBG	6.83min/26dB	[30]
KrF 准分子	248 nm	3mW	PMMA mPOFBG	0.33min/20dB	[37]
HeCd	325nm	30mW	PMMA mPOF LPG	7min/20dB	[31]
HeCd	325nm	30mW	PMMA LPG	5.3min/15dB	[32]
HeCd	325nm	30mW	PMMA TFBG	—/12%	[33]
CO ₂	10μm	—	PMMA mPOF LPG	—/25dB,13dB	[40]
三倍频 Nd:YAG	355nm	677mW·cm ⁻²	单模和多模 POFBG	16min/25%	[41]
HeCd	325nm	5W·cm ⁻²	TOPAS mPOFBG	338min/20dB	[45]
HeCd	325nm	30mW	TOPAS mPOFBG	—/20dB	[46]
HeCd	325nm	6mW	TOPAS POFBG	4min/30dB	[47]
飞秒激光系统	517nm,220fs	—	多模 CYTOP POFBG	—/5.5dB	[43],[44]
HeCd	325nm	4mW	PC mPOFBG	4min/25dB	[48]

3 PMMA 聚合物光纤光栅

PMMA 俗称有机玻璃,绝大部分聚合物光纤是基于 PMMA 制备的,其紫外光敏性使聚合物光纤光栅的制备成为可能。聚合物光纤光栅的中心波长调谐范围宽,可覆盖密集波分复用技术的整个波长窗口,但在第三通信窗口的传输损耗高^[49]。

3.1 PMMA 聚合物光纤光栅的制备

1999 年,新南威尔士大学的 XIONG 等人首次报道了 PMMA 聚合物 FBG 的制备。采用三倍频 Nd:YAG 抽运的二倍频 OPO 和改进相位掩模法制备的 FBG 长度为 10mm,中心波长为 1576.5nm,3dB 带宽约 0.5nm,峰值反射功率为 6.99dB^[5]。

2014 年,丹麦科技大学的 BUNDALO 等人采用 HeCd 激光器和相位掩模法制备的 PMMA 微结构 POFBG 中心波长为 632.6nm,3dB 带宽为 0.3nm ~ 0.4nm,峰值反射功率高达 26dB,光纤端面结构如图 3a 所示^[30]。2015 年,葡萄牙电信研究所的 OLIVEIRA 等首次采用 KrF 准分子激光器和相位掩模法制备的 4.5mm 长 FBG 中心波长为 1514nm,峰值反射功率超过 20dB,3dB 带宽约 0.16nm,且对 0% ~ 2% 应变范围的线性响应为 1.65pm/μ ϵ ,光纤端面结构如图 3b 所示^[37]。

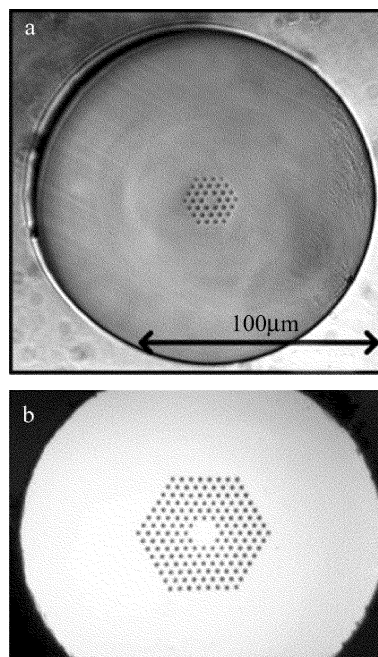


图 3 微结构聚合物光纤端面结构

a—PMMA 微结构聚合物光纤^[30] b—微结构聚合物光纤^[37]

近年来,聚合物长周期光纤光栅和倾斜光纤布喇格光栅的制备及特性也相继被报道出来。2006 年,ZHU 教授课题组采用逐点写入法在掺偶氮苯聚合物光纤中制备了 LPG^[42]。2014 年,弗罗茨瓦夫理工大学

的 KOWAL 等人采用聚焦 HeCd 激光和点点写入法在包层掺 trans-4-stilbenemethanol 的微结构聚合物光纤中制备的 LPG 透射谱峰值功率达 -20dB, 带宽为 45nm, 透射谱如图 4a 所示^[31]; 次年, 他们采用相同的方法在包层掺偶氮苯的微结构 POF 中制备的 LPG 透射谱峰值功率达 -15dB, 带宽为 22nm, 透射谱如图 4b 所示^[32]。2014 年, 蒙斯大学的 HU 和香港理工大学的 PUN 等人首次采用 HeCd 激光器和扫描相位掩模法制备的 6mm 3° TFBG 在 1.42 ~ 1.49 折射率范围内的最大灵敏度为 13nm/RIU, 透射谱如图 4c 所示^[33]。2015 年, BUNDALO 等人对 HeCd 激光束入射角对 PMMA mPOFBG 制备的影响进行了研究^[34]; 次年, 他们首次采用 CO₂ 激光器和逐点写入法制备了 PMMA 微结构聚合物长周期光栅^[40]。

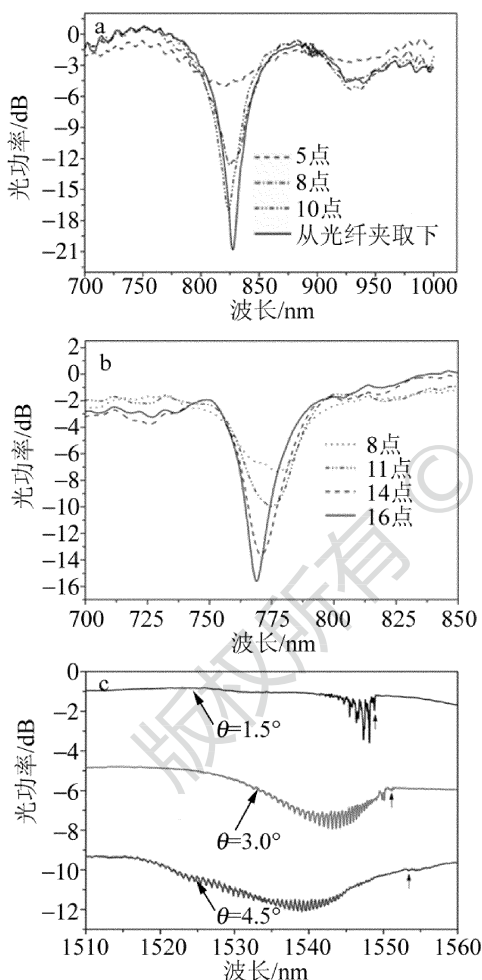


图 4 PMMA LPG 和倾斜 FBG 的透射谱^[31-33]

a—PMMA 微结构聚合物 LPG 透射谱^[31] b—PMMA 微结构聚合物 LPG 透射谱^[32] c—PMMA 倾斜 FBG 透射谱^[33]

此外, 科研人员采取不同的手段提高聚合物光纤光栅的性能, 其中包括掺杂、减小包层直径等。2010 年, 中国科学技术大学的 LUO 等人首次采用 355nm 三倍频 Nd:YAG 激光器和改进相位掩模法分别在单模和多模掺安息香二甲醚 (benzyl dimethyl ketal, BDK) 的聚

合物光纤中制备了 FBG^[41]。2011 年, 该校 ZHU 课题组报道了掺杂 BDK 的 PMMA FBG 的制作及传感特性^[50]。2012 年, 阿斯顿大学的 SÁEZ-RODRÍGUEZ 等人采用 HeCd 激光器和相位掩模法在掺杂 BDK 单模 mPOF 中制备的 FBG 透射谱峰值功率为 -23dB, 光致折射率变化达 3.2×10^{-4} ^[35]。2014 年, HU 等采用 HeCd 激光器和扫描相位掩模法在包层轻微腐蚀的 PMMA POF 中制备了高反射率 FBG, 当包层直径减小 12% 时, 光栅峰值反射功率从 1.25dB 增加到 15.23dB, 且包层直径的减小可以改善 POFBG 的轴向应变灵敏度, 但对温度及环境折射率响应无影响^[36]。

3.2 PMMA 聚合物光纤光栅的应用

相比石英光纤光栅, 聚合物光纤光栅的中心波长调谐范围宽。1999 年, XIONG 等人通过拉伸实现 PMMA POFBG 的 Bragg 波长调谐范围达 20nm^[5]。2001 年, LIU 等人报道了单模 PMMA FBG 的热可调性, Bragg 波长在 20°C ~ 70°C 范围内的变化大于 18nm, 且 PMMA 光纤光栅比石英光纤光栅的热稳定性更好^[51]。

聚合物光纤光栅同样可用于诸多参量的传感, 如应变、温度、加速度、压力和水分等。2006 年, ZHU 课题组对聚合物长周期光栅的轴向应变、温度和横向压力特性进行了研究^[42]。2012 年, 丹麦科技大学的 STEFANI 等人首次采用 PMMA mPOFBG 和加速度-应变换能器制备了加速度计, Bragg 波长和加速度呈线性响应, 可测最大加速度达 15g, 灵敏度高达 19pm/g, 是石英 FBG 加速度计的 4 倍多^[52-53]。2015 年, BUNDALO 等人采用 LPG 和压力-应变换能器研制了压力传感器, 可测最大压力达 15kPa^[40]。2016 年, ZHANG 和 WEBB 采用 PMMA POFBG 湿度传感器测量变压器油中水分, 其灵敏度可达 290nm/%, 最小可检测水分含量低于 0.05mg/L^[54]。

4 TOPAS 聚合物光纤光栅

TOPAS 是由宝理公司研发出的一种环烯烃共聚物商品名, 基于 TOPAS 的聚合物光纤光栅可避免 PMMA 的温度-湿度或应变-湿度等交叉灵敏度问题。2011 年, 丹麦科技大学的 YUAN 等人首次发现 TOPAS mPOFBG 在 850nm 和 1550nm 窗口的湿度灵敏度比 PMMA POFBG 小 50 倍以上, 因而可应用于应变或温度的长期监测而无需考虑湿度交叉灵敏度问题^[45]。

YUAN 等人首次采用 HeCd 激光器和相位掩模法制备的 10mm 长 TOPAS mPOFBG 的反射谱如图 5a 所示, 中心波长为 870nm, 3dB 带宽为 0.34nm, 在 0% ~ 2.17% 应变范围的线性响应为 0.64pm/ $\mu\epsilon$, 在 23°C ~

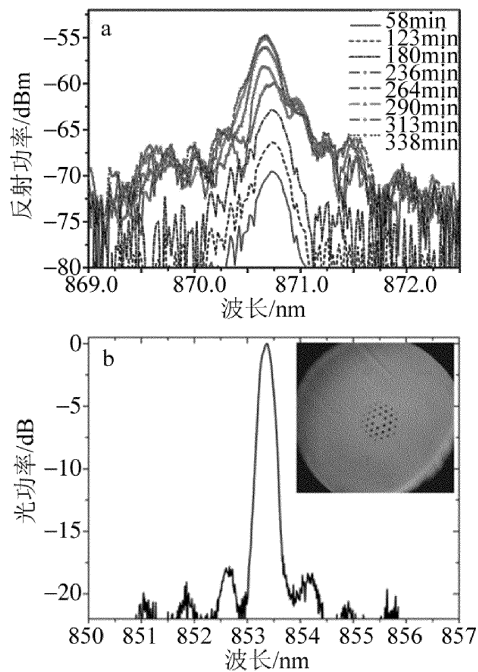


图 5 TOPAS mPOFBG 的反射谱^[45-46]

a—微结构聚合物 FBG 的反射谱 b—微结构聚合物 FBG 的反射谱
32.6℃ 温度范围的线性响应为 $-78\text{pm}/^\circ\text{C}$ ^[45]。2013 年,派图拉斯大学的 MARKOS 等人采用相同方法制备的 TOPAS mPOFBG 的反射谱如图 5b 所示,中心波长为 853.4nm,峰值反射功率为 20dB,在 0% ~ 0.16% 应变范围的线性响应为 $1.0\text{pm}/\mu\text{E}$,且工作温度高达 110℃^[46]。

2016 年,丹麦科技大学的 WOYESSA 等人首次采用 HeCd 激光器和相位掩模法制备的 TOPAS POFBG 中心波长为 869.53nm,3dB 带宽为 0.29nm,峰值反射

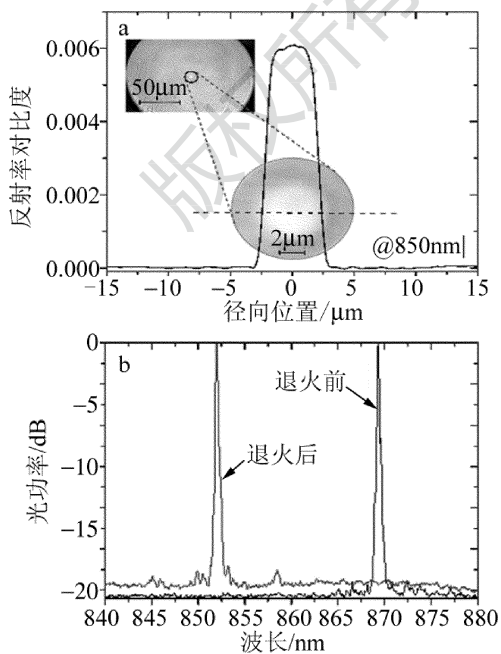


图 6 TOPAS 聚合物光纤端面结构及 FBG 的反射谱^[47]

a—聚合物光纤端面及折射率分布 b—聚合物 FBG 的反射谱

功率高达 30dB。阶跃折射率光纤横截面折射率分布和光纤布喇格光栅反射谱如图 6 所示。在 0% ~ 3% 应变范围的线性响应为 $0.76\text{pm}/\mu\text{E}$,在 20℃ ~ 105℃ 温度范围的线性响应分别为 $-17.57\text{pm}/^\circ\text{C}$ (升温) 和 $-17.3\text{pm}/^\circ\text{C}$ (降温)^[47] (注:图 6b 中的原图纵坐标单位为 dBm/nm,个人认为可能是原作者笔误,这里改为 dB)。

5 CYTOP 聚合物光纤光栅

CYTOP 是旭硝子公司研发的一种透明氟聚合物的品牌,CYTOP 聚合物光纤在紫外到红外波段的透光性能远优于 PMMA,其理论损耗极限 ($0.3\text{dB}/\text{km}@1550\text{nm}$) 与石英光纤相似。此外,与 PMMA 渐变折射率光纤和石英多模光纤相比,CYTOP 多模光纤的带宽更大。基于上述优势,CYTOP 聚合物光纤有望应用于远距离传感(如结构健康监测等)、高速数据通信等领域。

2001 年,LIU 等人首次发现 CYTOP 的光敏特性,采用 355nm 三倍频 Nd:YAG 激光器和相位掩模法在 CYTOP 薄板中制备了体光栅^[49,55]。2002 年,LIU 等人报道了 CYTOP 聚合物光栅的热可调性和稳定性,中心波长从 20℃ 时的 1410nm 线性变化到 80℃ 时的 1419nm,且 CYTOP 光纤光栅的热稳定性比石英和 PMMA 光纤光栅更好^[55]。2014 年,开姆尼茨工业大学的 KOERDT 等人首次采用准分子激光器和相位掩模法对 CYTOP 多模聚合物 FBG 的制备和特性进行了研究^[38-39]。2015 年,塞浦路斯理工大学的 LACRAZ 等人首次采用飞秒激光和直接写入法制备的 3.2mm 长 CYTOP POFBG 中心波长为 1577.7nm,3dB 带宽为 0.25nm,峰值反射功率达 5.23dB^[43]。2016 年,

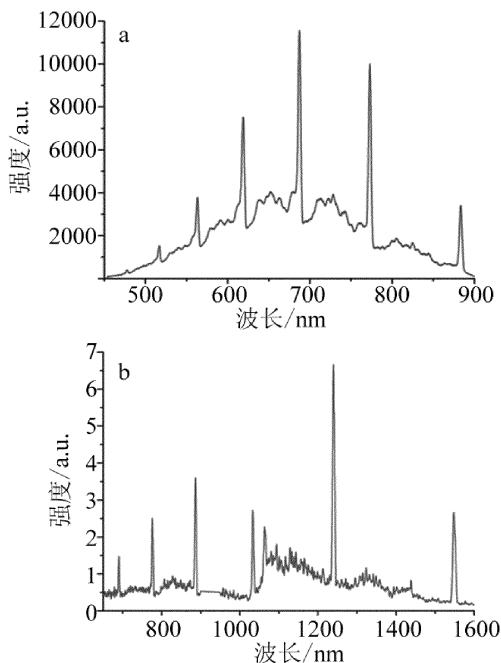


图 7 CYTOP 多模 POFBG 的反射谱^[44]

STAJANCA 和 LACRAZ 等人首次对 CYTOP POFBG 的应变响应进行了研究,多模 POFBG 的应变灵敏度从 517nm 的 4.82nm/% 到 883nm 的 8.12nm/% 呈近似线性增长,图 7 所示为多模 POFBG 的反射谱。可见,CYTOP POFBG 在 800nm ~ 850nm 的应变灵敏度比石英 FBG (6.3nm/%) 和 PMMA FBG (7.1nm/%) 更高^[44]。

6 PC 聚合物光纤光栅

PC 作为一种工程塑料,具有优异的透明度和冲击强度。PC 对可见光是透明的,可作为 PMMA 的替代材料。其次,PC 的应变极限高且易弯。作为玻璃转化温度最高的一种透明塑料,PC 的工作温度范围更宽。然而,由于聚碳酸酯对湿度敏感,故 PC 聚合物光纤的温度或应变传感会受湿度交叉灵敏度的影响。

2016 年,丹麦科技大学的 FASANO 等人首次采用 HeCd 激光器和相位掩模法制备的 PC 微结构聚合物光纤布喇格光栅中心波长为 892.4nm,3dB 带宽为 0.46nm,峰值反射功率高达 25dB。mPOF 的端面结构和 mPOFBG 的反射谱如图 8 所示。FBG 在 0% ~ 3% 应变范围的线性响应为 0.701pm/ $\mu\epsilon$,在 23.6℃ ~ 125℃ 温度范围的线性响应为 -29.99pm/℃ 和 -29.78pm/℃。此外,PC mPOFBG 的最高工作温度 (125℃) 比 TOPAS mPOFBG (110℃) 和 PMMA (92℃) 更高,为可靠耐高温聚合物 FBG 技术的发展奠定了基础^[48]。

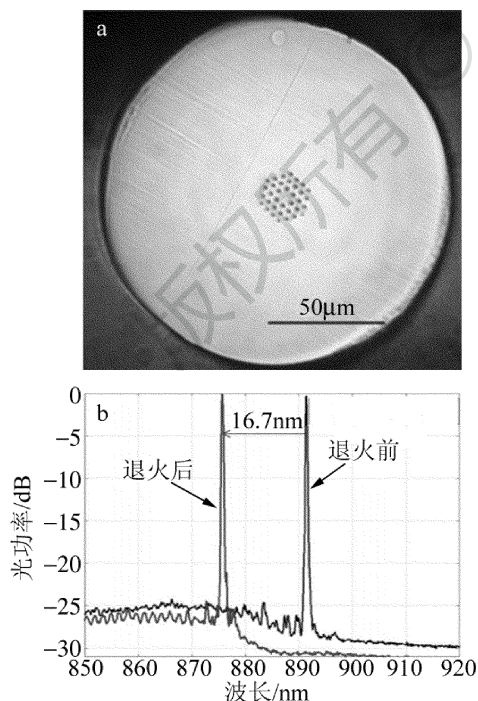


图 8 PC 微结构聚合物光纤端面结构及 FBG 的反射谱^[48]

7 结 论

聚合物光纤光栅技术集聚合物光纤技术和光纤光

栅技术于一体,不仅具有光纤光栅的诸多优良特性,还因聚合物自身的特性而具有比石英光纤光栅更高的灵敏度、更宽的响应范围。自 1999 年第 1 支聚合物光纤光栅问世以来,科研工作者采用不同的激光器和方法研制出多种不同类型的聚合物光纤光栅,并对其特性进行了深入研究。然而由于聚合物自身的高传输损耗等缺点,目前聚合物光纤光栅技术还停留在研究阶段,没有走向应用。相信随着科技的进一步发展和科研人员不懈的努力,该技术终会从研究走向应用,成为体内生物传感、高温传感和高灵敏度传感等领域不可或缺的一员。国外在聚合物光纤光栅领域取得了不错的研究成果,而我国在这一领域的研究还在起步阶段。

参 考 文 献

- [1] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] CHU Zh Zh, YOU L B, WANG Q Sh, *et al.* Development of optical fiber sensing technology for harmful gases detecting[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(9): 1-4(in Chinese).
- [3] PENG G D, CHU P L. Recent research on polymer optical fiber photosensitivity and highly tunable optical fibre Bragg grating[J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 4110: 123-138.
- [4] JOHNSON I P. Grating devices in polymer optical fibre[D]. Birmingham, UK: Aston University, 2012: 16-44.
- [5] XIONG Z, PENG G D, WU B, *et al.* Highly tunable Bragg gratings in single-mode polymer optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(3): 352-354.
- [6] HAND D P, RUSSELL P S J. Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers[J]. Optics Letters, 1990, 15(2): 102-104.
- [7] POUMELLE C, GUENOT P, RIANI I, *et al.* UV induced densification during Bragg grating inscription in Ge:SiO₂ preforms[J]. Optical Materials, 1995, 4(4): 441-449.
- [8] LEMAIRE P J, ATKINS R M, MIZRAHI V, *et al.* High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres[J]. Electronics Letters, 1993, 29(13): 1191-1193.
- [9] YU J M, TAO X M, TAM H Y. Trans-4-stilbenemethanol-doped photosensitive polymer fibers and gratings[J]. Optics Letters, 2004, 29(2): 156-158.
- [10] ZOUBIR A, LOPEZ C, RICHARDSON M, *et al.* Femtosecond laser fabrication of tubular waveguides in poly (methyl methacrylate)[J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1840-1842.
- [11] LIPPERT T, DICKINSON J T. Chemical and spectroscopic aspects of polymer ablation: special features and novel directions [J]. Chemical Reviews, 2003, 103(2): 453-486.
- [12] WOCHNOWSKI C, METEV S, SEPOLD G. UV-laser-assisted modification of the optical properties of polymethylmethacrylate[J]. Applied Surface Science, 2000, 154: 706-711.
- [13] CHOI J O, MOORE J A, CORELLI J C, *et al.* Degradation of poly (methylmethacrylate) by deep ultraviolet, X-ray, electron beam, and proton beam irradiations [J]. Journal of Vacuum Science & Technology: Microelectronics Processing and Phenomena, 1988, B6(6): 2286-2289.

- [14] SRINIVASAN R, BRAREN B, CASEY K G. Ultraviolet laser ablation and decomposition of organic materials[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1990, 62(8): 1581-1584.
- [15] KADA T, HIRAMATSU T, OGINO K, *et al.* Fabrication of refractive index profiles in poly (methyl methacrylate) using ultraviolet rays irradiation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(2R): 876-880.
- [16] BOWDEN M J, CHANDROSS E A, KAMINOW I P. Mechanism of the photoinduced refractive index increase in polymethyl methacrylate [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(1): 112-117.
- [17] TOMLINSON W J, KAMINOW I P, CHANDROSS E A, *et al.* Photoinduced refractive index increase in poly (methylmethacrylate) and its applications[J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 16(12): 486-489.
- [18] ROBERTSON C G, WILKES G L. Refractive index: a probe for monitoring volume relaxation during physical aging of glassy polymers [J]. *Polymer*, 1998, 39(11): 2129-2133.
- [19] KOPIETZ M, LECHNER M D, STEINMEIER D G, *et al.* Light-induced refractive index changes in polymethylmethacrylate (PMMA) blocks[J]. *Polymer Photochemistry*, 1984, 5(1/6): 109-119.
- [20] ESTLER R C, NOGAR N S. Mass spectroscopic identification of wavelength dependent UV laser photoablation fragments from polymethylmethacrylate[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(18): 1175-1177.
- [21] GEORGIU S, KAUTEK W, KRUGER J, *et al.* *Polymers and light* [M]. Heidelberg, Germany: Springer Science & Business Media, 2004: 20-40.
- [22] LEKISHVILI N, NADAREISHVILI L, ZAIKOV G, *et al.* *Polymers and polymeric materials for fiber and gradient optics*[M]. Boca Raton, USA: Chemical Rubber Company Press, 2002: 15-50.
- [23] LIU H Y, LIU H B, PENG G D, *et al.* Observation of type I and type II gratings behavior in polymer optical fiber[J]. *Optics Communications*, 2003, 220(4): 337-343.
- [24] KALLI K, DOBB H L, WEBB D J, *et al.* Development of an electrically tuneable Bragg grating filter in polymer optical fibre operating at 1.55 μm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(10): 3155.
- [25] SCHAFFER C B. *Interaction of femtosecond laser pulses with transparent materials*[D]. Cambridge, USA: Harvard University, 2001: 27-29.
- [26] BAUM A, SCULLY P J, BASANTA M, *et al.* Photochemistry of refractive index structures in poly (methyl methacrylate) by femtosecond laser irradiation[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(2): 190-192.
- [27] SCULLY P J, JONES D, JAROSZYNSKI D A. Femtosecond laser irradiation of polymethylmethacrylate for refractive index gratings [J]. *Journal of Optics*, 2003, A5(4): S92-S96.
- [28] LIU H Y, PENG G D, CHU P L. Polymer fiber Bragg gratings with 28dB transmission rejection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(7): 935-937.
- [29] JIN Zh K. *Preparation of the grating structure in polymer optical fiber by femtosecond laser*[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 40-54(in Chinese).
- [30] BUNDALO I L, NIELSON K, MARKOS C, *et al.* Bragg grating writing in PMMA microstructured polymer optical fibers in less than 7 minutes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5270-5276.
- [31] KOWAL D, STATKIEWICZ-BARABACH G, MERGO P, *et al.* Microstructured polymer optical fiber for long period gratings fabrication using an ultraviolet laser beam[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2242-2245.
- [32] KOWAL D, STATKIEWICZ-BARABACH G, MERGO P, *et al.* Inscription of long period gratings using an ultraviolet laser beam in the diffusion-doped microstructured polymer optical fiber [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(20): 6327-6333.
- [33] HU X, PUN C F J, TAM H Y, *et al.* Tilted Bragg gratings in step-index polymer optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6835-6838.
- [34] BUNDALO I L, NIELSEN K, BANG O. Angle dependent Fiber Bragg grating inscription in microstructured polymer optical fibers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3699-3707.
- [35] SÁEZ-RODRÍGUEZ D, NIELSEN K, RASMUSSEN H K, *et al.* Highly photosensitive polymethyl methacrylate microstructured polymer optical fiber with doped core [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3769-3772.
- [36] HU X, PUN C F J, TAM H Y, *et al.* Highly reflective Bragg gratings in slightly etched step-index polymer optical fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18807-18817.
- [37] OLIVEIRA R, BILRO L, NOGUEIRA R. Bragg gratings in a few mode microstructured polymer optical fiber in less than 30 seconds [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10181-10187.
- [38] KOERDT M, KIBBEN S, HESSELBACH J, *et al.* Fabrication and characterization of Bragg gratings in a graded-index perfluorinated polymer optical fiber [J]. *Procedia Technology*, 2014, 15: 138-146.
- [39] KOERDT M, KIBBEN S, BENDIG O, *et al.* Fabrication and characterization of Bragg gratings in perfluorinated polymer optical fibers and their embedding in composites [J]. *Mechatronics*, 2016, 34: 137-146.
- [40] BUNDALO I L, LWIN R, LEON-SAVAL S, *et al.* All-plastic fiber-based pressure sensor [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4): 811-816.
- [41] LUO Y, ZHANG Q, LIU H, *et al.* Gratings fabrication in benzildimethylketal doped photosensitive polymer optical fibers using 355nm nanosecond pulsed laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 751-753.
- [42] CHEN R. *Study on sensing characteristics of polymer long period fiber gratings*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 48-54(in Chinese).
- [43] LACRAZ A, POLIS M, THEODOSIOU A, *et al.* Femtosecond laser inscribed Bragg gratings in low loss CYTOP polymer optical fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(7): 693-696.
- [44] STAJANCA P, LACRAZ A, KALLI K, *et al.* *Strain sensing with femtosecond inscribed FBGs in perfluorinated polymer optical fibers* [C]//Brussels, Belgium: SPIE Photonics Europe, 2016: 989911.
- [45] YUAN W, KHAN L, WEBB D J, *et al.* Humidity insensitive TOPAS polymer fiber Bragg grating sensor [J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19731-19739.
- [46] MARKOS C, STEFANI A, NIELSEN K, *et al.* High-Tg TOPAS microstructured polymer optical fiber for fiber Bragg grating strain sensing at 110 degrees [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4758-4765.
- [47] WOYESSA G, FASANO A, STEFANI A, *et al.* Single mode step-index polymer optical fiber for humidity insensitive high temperature fiber Bragg grating sensors [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1253-1260.
- [48] FASANO A, WOYESSA G, STAJANCA P, *et al.* Fabrication and characterization of polycarbonate microstructured polymer optical fibers for high-temperature-resistant fiber Bragg grating strain sensors [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(2): 649-659.
- [49] LIU H Y, PENG G D, CHU P L, *et al.* Photosensitivity in low-loss

- perfluoropolymer (CYTOP) fibre material[J]. Electronics Letters, 2001, 37(6): 347-348.
- [50] CHENG X Sh. Fabrication and sensing characteristics of polymer bragg fiber gratings[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011: 31-84(in Chinese).
- [51] LIU H Y, PENG G D, CHU P L. Thermal tuning of polymer optical fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 824-826.
- [52] STEFANI A, YUAN W, MARKOS C, *et al.* Narrow bandwidth 850nm fiber Bragg gratings in few-mode polymer optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(10): 660-662.
- [53] STEFANI A, ANDRESEN S, YUAN W, *et al.* High sensitivity polymer optical fiber-Bragg-grating-based accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(9): 763-765.
- [54] ZHANG W, WEBB D J. PMMA based optical fiber bragg grating for measuring moisture in transformer oil[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2427-2430.
- [55] LIU H Y, PENG G D, CHU P L. Thermal stability of gratings in PMMA and CYTOP polymer fibers[J]. Optics Communications, 2002, 204(1): 151-156.

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©