

激光与光电子学进展

聚合物光纤光栅制备及应用进展

闵锐*, 何润杰, 李小俤

北京师范大学珠海校区认知神经科学与学习国家重点实验室认知神经工效研究中心, 珠海 广东 519085

摘要 近年来, 聚合物光纤因其体积小、质量小、柔软、成本低等诸多优点, 以及不同于石英光纤的生物相容性等优良特性, 在传感及通信等领域逐渐受到了重视。系统介绍了包括聚甲基丙烯酸甲酯、环烯烃共聚物、环烯烃均聚物以及聚碳酸酯等的聚合物光纤组成材料, 基于不同波段的刻写激光光源如 248 nm、266 nm、325 nm 等的光栅制备技术, 以及包括相位掩模板刻写、飞秒激光直写技术以及飞秒激光双光子聚合刻写技术等的光栅刻写技术。最后, 回顾了近些年聚合物光纤光栅在传感及通信领域的研究进展, 并进行了总结和展望。

关键词 光纤光学; 聚合物光纤; 布拉格光栅; 微结构光纤; 光纤传感

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306020

Fabrication and Application of Polymer Optical Fiber Gratings: A Review

Min Rui*, He Runjie, Li Xiaoli

Center for Cognition and Neuroergonomics, State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning,
Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519085, China

Abstract In recent years, polymer optical fibers have received increasing attention in the fields of sensing and communication because of their small size, light weight, softness, low cost, and excellent characteristics such as biocompatibility compared with silica optical fibers. We analyze various materials for polymer fibers, including polymethyl methacrylate (PMMA), ring olefin copolymer, ring olefin polymer, and polycarbonate; different grating fabrication techniques, including those using lasers with different wavelengths (e. g., 248, 266, and 325 nm); and different engraving techniques, including phase mask, femtosecond laser direct writing, and femtosecond laser two-photon polymerization. In addition, we review the research progress in polymer optical fiber grating in the fields of sensing and communication in recent years and summarize the major developments.

Key words fiber optics; polymer optical fiber; fiber Bragg grating; microstructured optical fiber; optical fiber sensing

OCIS codes 060.2340; 060.3738; 060.4080

1 引 言

自 Hill 等首次发现石英光纤的光敏性并利用光敏性制备出光纤布拉格光栅以来, 光纤光栅已成为重要的必不可少的光纤无源器件。光纤光栅具有

体积小、质量小、抗电磁干扰、耐腐蚀、耦合性好和可复用等诸多优点, 同时具有便于构成传感网络、可进行绝对测量、便于形成规模生产等优势^[1]。在光纤传感领域, 光纤光栅可用于多种参数的监测, 如应力^[2]、温度^[3-4]、压力^[5]、pH 值^[6]、氢气浓度^[7]等,

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-04-24; 录用日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(62003046)、广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011997)、广东省海外名师项目(2020A1414010393)

通信作者: *ruimin@bnu.edu.cn

在光纤通信领域,光纤光栅可用于滤波^[8]、光纤激光器^[9-10]、色散补偿^[11]等。与石英光纤相比,聚合物光纤(POF)具有低杨氏模量、高柔韧性和生物相容性等优点^[12]。自1999年首个聚合物光纤布拉格光栅(POFBG)问世以来^[13],POF的关注度逐渐提高。聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料具有低成本的优点,常被用于制作POF,此外还可以使用一些其他聚合物材料,如环烯烃共聚物(TOPAS公司)^[14]、环烯烃聚合物(Zeonex公司)^[15]、聚碳酸酯(PC)^[16]、聚D,L-丙交酯(PDLLA)^[17]和氟化聚合物CYTOP^[18]等。聚合物材料除具有多样性外,与石英光纤类似,可根据芯径和结构的不同进行分类,如阶跃型聚合物光纤(SI POF)、微结构聚合物光纤(mPOF)、渐变型聚合物光纤(GI POF)。然而到目前为止,具有生物相容性且价格低廉的PMMA材料依然是制备聚合物光栅器件的首选。相比于普通石英光纤光栅器件,聚合物光纤光栅器件由于光纤材料的灵活性、延展性以及亲生物性较强,其灵敏度大幅提高,应变范围增大,已被成功应用于pH值^[19]、生物量^[20]、应力^[21]和温度^[22]等方面的测量。

早些年,Peters等^[23]对基于POF的应变和温度传感应用进行了总结,表明POF在传感应用中的优越性;Bilro等^[24]对基于POF的强度调制传感应用进行了总结,表明POF仅适用于对强度调制精度要求不高的场景,例如结构健康监测^[25]、变形监测^[26]和化学量检测^[27];Mizuno等^[28]总结了POF中布里渊散射的基本特性,并对基于POF准分布传感器技术的结构健康监测进行了探究^[29];Zhong等^[30-31]探究了温湿度对POF灵敏度的影响,通过冷-热处理和真空热处理等方式,获得了温度不敏感的POF,扩展了POF在传感中的应用。基于波长敏感光栅器件的光纤传感技术是目前最有应用前景的光纤传感技术,基于POF的波长敏感光栅器件也取得了巨大的进步,如Dobb等^[32]在2005年首次使用中心波长为325 nm的连续激光器,制备出基于少模和单模mPOF的布拉格光栅;Saez-Rodriguez等^[33]于2010年制备出首个基于紫外刻写的聚合物光纤长周期光栅;Johnson等^[34]于2010年利用中心波长为827 nm的激光器制备出多模PMMA POF布拉格光栅。

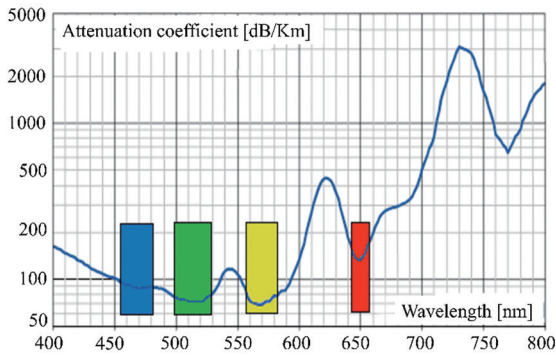
在光纤通信领域,由于室内网络中越来越多新兴业务的出现,如智能家居系统、可见光通信等,短距离通信领域对高容量的需求逐渐增加。而具有质量小和高传输容量特点的POF是短距离通信的

理想选择^[35]。早些年,Koike等^[36]回顾了POF的现状,汇总了GI POF作为下一代光纤材料的研究成果;Zubia等^[37]回顾了POF的主要类型、制造方法和潜在应用;Polishuk^[38]讨论了大芯径POF在低比特率和短距离时的应用;近年来,Koike教授课题组^[39]开发了120 Gbit/s的GI POF,并用于无压缩4K/8K视频传输的圆珠笔互连科技(ballpoint pen interconnection technology)。Pinzón等^[40]提出基于POF的五信道可见光波分复用系统传输网络,其传播速度达2 GByte/s,在未来的家庭网络中有很大的应用前景。Osahon等^[41]实现了使用激光二极管(LD)作为光源的多电平脉冲幅度调制(PAM-M)方案,在短距离阶跃型POF上传输速率达到 10^3 Mbit/s。Forni等^[42]实现了超过50 m的1-mm直径的GI POF,并用于传输家庭网络的IEEE 802.11n 16-QAM 40 MHz带宽WLAN、964-QAM LTE-A频带和1.7 Gb/s 4-PAM基带信号。POF传输效率的提升为光通信领域中使用POFBG进行色散补偿、光信息调制和波分复用提供了可能。

近年来,Webb等^[43-48]对POFBG的进展进行了综述,集中介绍了均匀POF光栅的制备和应用。为了更好地服务于传感和通信领域,近年来研究人员致力于从快速制备、灵活性、实用性方面对光栅制作工艺进行改善,并探究各种新型的潜在应用。本文介绍了POF的研究背景、POFBG制作材料和工艺的研究进展以及其最新的一些典型应用。

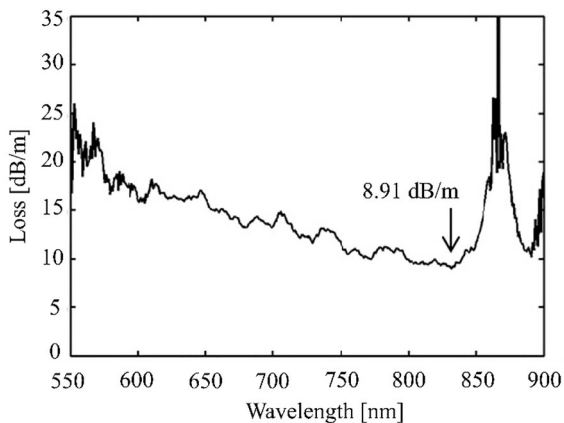
2 聚合物光纤材料

在20世纪60年代,美国杜邦有限责任公司以Crofon命名首个基于PMMA的POF。然而由于衰减严重,最初主要用于汽车和飞机仪表板的短距离照明^[49]。Brown等^[50]对Crofon POF的损失机制进行了探究。1968年,杜邦公司声称其制备的PMMA POF的最小损耗达到了300 dB/km^[51]。通常,PMMA材料有三个光传输窗口,即570、650和780 nm^[52],对于超过600 nm的波长,衰减主要是由C—H键的拉伸吸收所致^[52]。目前,标准PMMA POF的直径通常为1 mm,数值孔径(NA)为0.5,650 nm的衰减系数小于130 dB/km,如图1所示^[53]。1990年,Koike等^[54]提出了首个PMMA GI POF,纤芯折射率变化是由甲基丙烯酸甲酯(MMA)和具有可变反应性共聚物之间的共聚所致。然而PMMA GI POF很难达到单模特性。为解决这一问题,聚

图1 PMMA 聚合物光纤传输损耗曲线^[53]Fig. 1 Transmission loss of PMMA polymer optical fiber^[53]

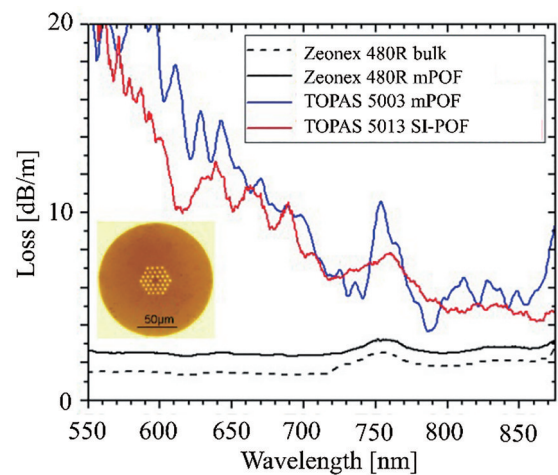
合物光纤研究者们将注意力转移至微结构光纤(也叫光子晶体光纤)。20世纪90年代,微结构光纤由Phillip Russel等首次提出并基于石英光纤成功制备^[55],2001年,澳大利亚学者报道了首个PMMA聚合物微结构光纤^[56],微结构可以诱导各种光学效应,如工作波长下无线的单模特性^[57]。PMMA材料还有一些其他特征,如吸水性最大可达到2%^[58]。水的吸收不仅提高了光纤的折射率,还可诱发材料膨胀^[59]。纯PMMA材料具有较低的光敏性,可以通过掺杂光敏性强的物质来提高其光敏性^[60]。

1986年,基于聚碳酸酯(PC)的POF被提出^[61],与其他POF材料相比,PC聚合物可以在更高的温度下工作,最高可达130℃^[53]。PC具有良好的波导材料性能,对可见光透明,具有良好的机械和光学性能^[62]。此外,PC的玻璃过渡温度(T_g)约为145℃,相比其他用于制作POF的光学透明材料,温度较高。图2是PC POF的典型传输损耗,其呈现从750 nm到850 nm的传输窗口,衰减系数约为10 dB/m^[61]。丹麦学者制备了一种在819 nm衰减

图2 PC 聚合物光纤传输损耗曲线^[62]Fig. 2 Transmission loss of PC polymer optical fiber^[62]

系数为4.06 dB/m的实心PC mPOF,制备流程为先制备预制棒,再通过低温光纤拉丝塔制备^[62]。PC材料的屈服应变(准弹性行为的限制)通常为5%左右,略低于PMMA(6%)^[63];PC材料具有较高的断裂临界点,约为36.3%,是PMMA的两倍多;PC材料的最大吸水量为0.3%,比PMMA材料^[61]约低一个数量级。近年来,英国学者利用3D打印预制棒成功制备出PC mPOF^[16]。

在温度或应变传感应用中,温度湿度交叉效应是一个急需解决的问题^[64],然而大多数聚合物材料具有较强的亲水性。因此,考虑使用疏水聚合物来降低温度湿度交叉灵敏度。疏水POF有环烯烃共聚合物,如TOPAS 8007^[65]和5013^[66],以及环烯烃同源聚合物,如Zeonex 480R^[67]。不同类型的TOPAS的 T_g 有很大差异,例如, TOPAS 8007的 T_g 仅为78℃,比PMMA的 T_g 低110℃^[67],而TOPAS 5013的 T_g 为134℃^[67]。TOPAS 8007聚合物的低 T_g 限制了该光纤用于传感时的温度测试范围。另一方面,Zeonex 480R的 T_g 为138℃,与TOPAS相比,Zeonex 480R的拉丝塔控制性能良好。图3表明了Zeonex mPOF和TOPAS阶跃型POF的传输损耗^[67]。

图3 Zeonex 聚合物光纤和TOPAS 聚合物光纤传输损耗曲线^[67]Fig. 3 Transmission loss of Zeonex polymer fiber and TOPAS polymer fiber^[67]

CYTOP是日本旭硝子股份公司研发的一种透明氟化聚合物,其特点是热稳定性高,损耗低,传输性能优异。实际上,CYTOP是目前唯一商用的全氟光纤。CYTOP分子由C—C、C—F和C—O键组成,这些键的基本拉伸振动波长相对较长,因此,与

其他聚合物相比, CYTOP 在近红外波长下振动吸收损耗要低得多。此外, 由于折射率低(587.6 nm 波段折射率 1.34), 该材料具有较低的色散和散射。基于 CYTOP 的 GIPOF 的衰减系数约为 10 dB/km, 波长约为 1.0 μm , 基于 CYTOP 的 GIPOF 的理论衰减系数在相同波长下约为 0.7 dB/km, 如图 4 所示^[36]。此外, 如果能在光纤制造过程中避免污染, 则 CYTOP POF 的衰减系数有望进一步降低^[68]。正是由于这些优点, CYTOP 被迅速地推广使用, 现已成为 POF 通信和传感应用的主流商业解决方案之一^[45]。

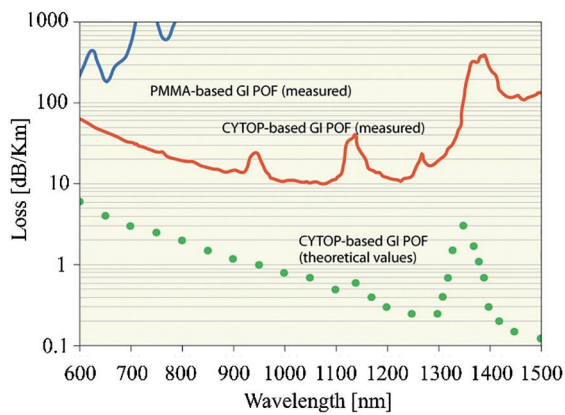


图 4 CYTOP 聚合物光纤传输损耗曲线^[36]

Fig. 4 Transmission loss of CYTOP polymer optical fiber^[36]

3 聚合物光纤光栅的制备工艺

聚合物光纤光栅(POFBG)通常利用激光直写法^[22]、萨格纳克干涉法^[69]和相位掩模法^[70]来制备。相位掩模法是目前刻写 FBG 最常用的一种方法, 尽管对掩模板的零级抑制程度要求很高, 并且制作不同波长的 FBG 需要使用不同的相位掩模板, 但装置简单稳定。激光直写技术在光栅结构和波长方面提供了灵活性, 但是光栅制备需要昂贵的飞秒激光系统, 并且激光直写分辨率限制了可见光波段光栅的制备。长周期光栅的常见制备方式有直接写入^[71]、热压印^[72]和振幅掩模^[73]。在本节中, 我们将介绍一些光栅制备工艺的最新进展, 如不同聚合物材料 POF 的制备以及一些特殊光栅器件的制备。

3.1 聚合物光纤光栅制备工艺

聚合物光纤光栅制备主要是基于聚合物材料的紫外光敏性, 光纤吸收紫外光后折射率发生变化。事实上, 光敏性强烈地依赖于波长和刻写机制, Luo 等^[44]表明, 自 20 世纪 70 年代 Bell 实验室发现这一特性以来^[74], 325 nm 波长被确定为 PMMA

材料折射率变化的首选波长。聚合物材料根据吸收光功率和波长的不同, 在复合反应中会发生一些不同的反应, 如光聚合反应、光解作用和光交联反应。香港理工大学 Yu 等^[75]提出利用光异构化来改变折射率, 研究表明掺杂了反式-4-二苯乙烯甲醇(TS)的 POF 在紫外光辐射下表现出不同的折射率变化, 然而这种方法只适用于特定的 POF。Sáez-Rodríguez 等^[76]提出通过增加制备过程中的应力来提高 PMMA 的光敏性, 并利用 PMMA mPOF 进行了实验验证。很多学者通过不断优化制备工艺来提升 POF 光栅的稳定性^[77-78], 如利用预退火技术来制备更稳定的光栅^[79]。据报道, 目前已经有多种用于制备 POF 光栅的激光器, 如 800 nm 钛蓝宝石激光放大器^[80-81]、532 nm Nd:YVO₄激光系统^[72, 82]、387 nm 钛蓝宝石飞秒激光器^[83]、355 nm Nd:YAG 激光器^[84]、325 nm 光学参量振荡器(OPO)脉冲激光器^[85]、325 nm He-Cd 激光器^[86]、266 nm Nd:YAG 激光器^[87]以及 248 nm KrF 准分子激光系统^[88]。

虽然首个聚合物光纤光栅是利用 325 nm 激光制备而成的^[89], 但由于 325 nm 波长的吸收率较低, 制备过程时间很长(约 1 h)。如何快速制备聚合物光纤光栅成为一个待解决的难题, 葡萄牙学者利用低能量低频率的 248 nm 脉冲激光快速制备出聚合物光纤光栅, 制备过程只需 10 s^[90]。随后, 对基于 248 nm 及 266 nm 激光的聚合物光纤光栅制备的研究不断地取得突破(如表 1 所示, 表中 FWHM 为半峰全宽), 如 Marques 等^[91]利用脉冲准分子 248 nm KrF 激光对多种聚合物材料光纤(PMMA, TOPAS, PC)进行光栅刻写, 结果表明基于 248 nm 激光刻写的光栅制备时间更短, 稳定性更好。Cheng 等^[92]利用单脉冲 248 nm 激光在 Zeonex 阶跃聚合物单模光纤中制备出稳定的光纤光栅。Pereira 等^[87]利用单脉冲 266 nm 激光在安息香二甲醚(BDK)掺杂的 PMMA mPOF 中制备出超过 8 dB 透射谱的 FBG。Min 等^[93]利用 266 nm 激光对多种结构(三环、四环、五环)的 PMMA mPOF 进行了 FBG 制备并分析了不同结构的光栅性能。

相位掩模法是最常用的光栅刻写方法, 常用的刻写激光器是 248 nm KrF 准分子激光系统。利用准分子激光器产生高能量、高重复频率的紫外激光脉冲, 激光束经过掩模板后在光纤表面形成干涉条纹, 从而在光纤纤芯形成周期性的折射率调制。在此基础上, 通过使用不同的掩模板、引入倾斜角度

表 1 用脉冲 248 nm KrF 激光系统刻写的 POFBG

Table 1 POFBG inscription with pulsed 248 nm KrF laser system

Type of POFs	Inscription time /s	FWHM /nm	Reflection band /dB	Opticmal energy /mJ
PMMA mPOF	25	0.4	32	6.0
TOPAS 8007 mPOF	25	0.6	31	5.5
TOPAS 5013 mPOF	20	0.6	23	6.0
TOPAS step-index POF	11	0.8	31	5.0
TOPAS 480R mPOF	15	0.7	28	3.5
PC mPOF	14	0.6	23	3.0

(入射光与掩模之间的相对角度)或偏心错位(主要基于飞秒逐点写作),可获得各种类型的光纤光栅器件^[94]。扫描相位掩模法是改进的相位掩模法,通过对相位掩模板施加不同的运动函数,可实现各种特殊光纤光栅的制备,并且光栅折射率调制的直流分量始终为常量。通常,通过对均匀相位掩模板的位置状态进行合理的实时控制,可以实现相移、切趾、啁啾以及其他复杂结构的特殊光纤光栅的制作而无须搭建多套复杂光路,且无须定制不同的相位掩模板,极大地节约了研究成本,并且获得了较高的工艺灵活性。

飞秒脉冲激光具有非常高的峰值功率以及非常短的脉冲,与透明介质相互作用时会产生非线性效应,从而实现材料折射率永久性改变,故飞秒激光直写技术比相位掩模板刻写技术具有更高的灵活性。近年来,基于 POF 的飞秒激光直写技术得到了广泛的关注。Lacraz 等^[95]利用飞秒激光逐线刻写法在 CYTOP 聚合物光纤中制备出反射率为 70% 的 FBG; Theodosiou 等^[18]通过逐面刻写法在 CYTOP 聚合物光纤中制备出长周期光栅。深圳大学王义平教授课题组在基于光纤的飞秒激光刻写技术方面做了非常深入的研究,近年来,基于飞秒激光双光子聚合技术制备出了聚合物光纤光栅。飞秒激光双光子聚合技术早期主要用于微光器件、光子晶体、微流控器件、微机械器件的制备,他们课题组^[22,96]提出利用光刻胶制备 POFBG,并将 POFBG 用于高灵敏度温度监测以及高速全光调制器。

3.2 聚合物光纤特殊光栅

特殊光栅器件如啁啾布拉格光栅(Chirped FBG)^[97]、倾斜布拉格光栅(TFBG)^[98]、相移布拉格光栅(PS-FBG)^[99]等在传感方面极具优势。近年来,基于 POF 的特殊光纤光栅器件制备及应用引起了广泛关注。

倾斜布拉格光栅是一种重要的传感器件,Hu

等^[100]首次在 POF 上实现了小角度(1.5°、3.0°、4.5°)倾斜布拉格光栅,即使相位掩模板与垂直光纤轴方向成微小夹角,同时为了减少刻写时激光器功率的限制,利用丙酮和乙醇的混合溶液(质量比 2:1)来控制光纤的直径。这种工艺可以降低 PMMA 对光的吸收,从而在纤芯中产生高对比度的条纹,获得一系列模式间隔清晰、规律性强的倾斜光栅梳状透射光谱,如图 5(a)所示。并在此基础上,首次实现了最大倾斜角度为 6° 的 TFBG,并通过溅射镀金获得 SPR 波的激发^[101],TFBG-SPR 的透射光谱如图 5(b)所示。

虽然早在 2005 年就提出利用聚合物啁啾布拉格光栅来对长距离光通信进行色散补偿的想法^[102],然而首个基于 POF 的啁啾布拉格光栅在 2017 年才被成功制备,利用的是 248 nm KrF 准分子激光器和 25 mm 啁啾相位掩模板^[103],得到的啁啾布拉格光栅宽为 3.9 nm,啁啾参数为 1.2 nm/cm,如图 6(a)所示,啁啾相位掩模法具有稳定性好的优点,但成本较高,灵活性较差。2018 年,Theodosiou 等^[104]使用飞秒激光直接写入法在商用 CYTOP 中获得啁啾布拉格光栅,该光栅由 2000 个周期组成,总长度约为 4.5 mm,带宽为 10 nm(啁啾约为 2.22 nm/mm),如图 6(b)所示。飞秒激光直接写入可以用于啁啾布拉格光栅的制备,但难以制备可见光波段光栅。首个可调谐啁啾布拉格光栅是基于 248 nm 紫外光,利用均匀相位掩模板在渐变直径的 mPOF 上成功制得^[105],在 1.6% 的应力作用下,啁啾约为 0.26 nm/mm,其反射谱如图 6(c)所示,应变灵敏度为 (0.71 ± 0.02) pm/ $\mu\epsilon$,温度灵敏度为 56.7 pm/°C。Min 等^[106]提出一种新型的聚合物光纤啁啾布拉格光栅制备方法,对局部光栅利用热水进行退火,获得了约 1.1 nm/mm 的啁啾布拉格光栅,如图 6(d)所示,不需要特殊的相位掩模或额外的蚀刻,并且可以很容易地控制中心波长和啁啾特性。

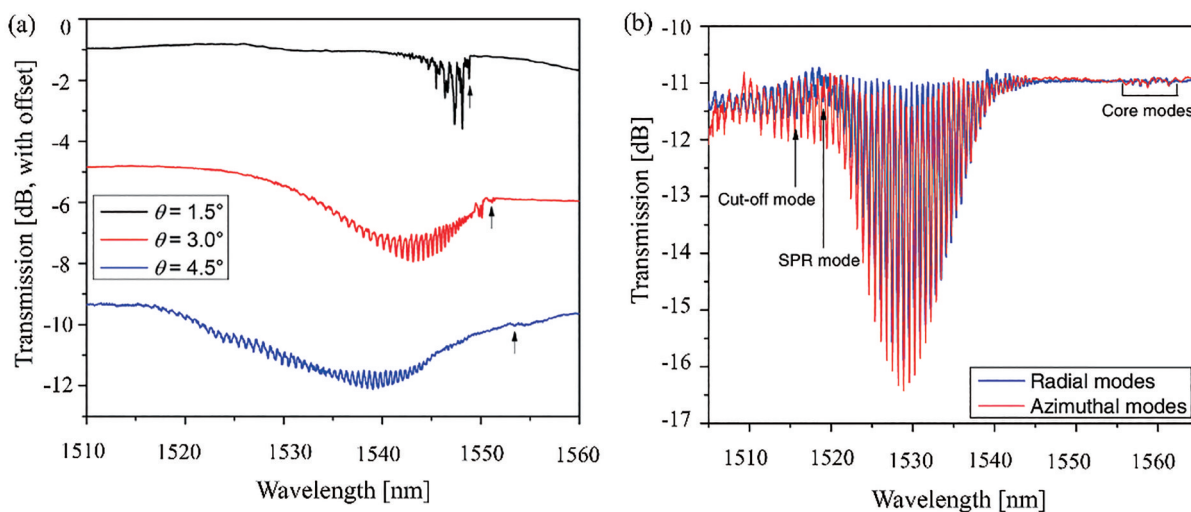


图 5 聚合物光纤倾斜布拉格光栅的 SPR 透射光谱。(a)小角度倾斜^[100]; (b)倾斜角度为 6°^[101]

Fig. 5 SPR transmission spectra of polymer fiber tilted Bragg grating. (a) Small angle tilted^[100]; (b) tilt angle of 6°^[101]

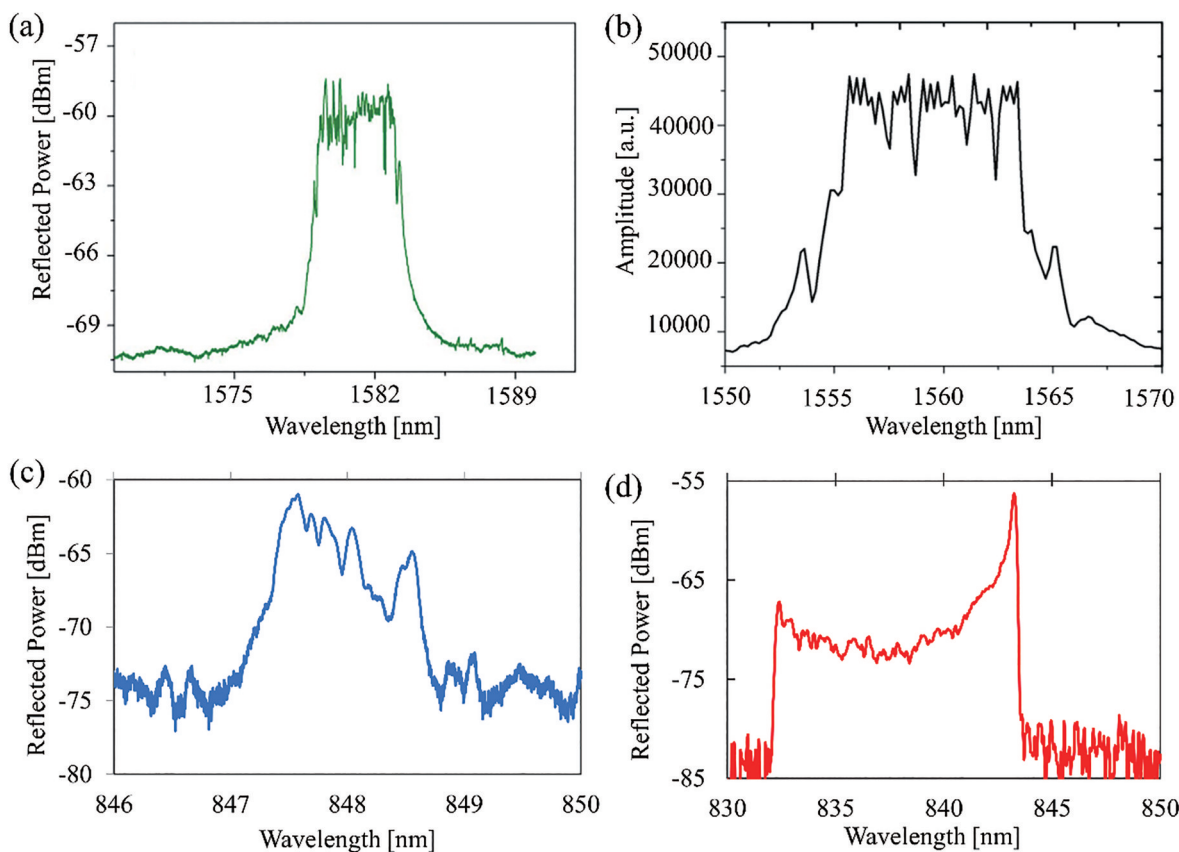


图 6 采用不同工艺制作啁啾 POFBG 的反射光谱功率。(a)啁啾相位掩模法^[103]; (b)飞秒直接刻写^[104]; (c)渐变直径应力法 (1.6%应变)^[105]; (d)热退火法^[106]

Fig. 6 Reflected spectral power of a chirped POFBG fabricated by different techniques. (a) Chirped phase mask^[103]; (b) femtosecond directly writing^[104]; (c) under 1.6% strain with tapering method^[105]; (d) thermal annealing^[106]

Min 等^[107]基于单模特性 BDK 掺杂的 mPOF, 利用 248 nm 激光单脉冲刻写技术, 将两个光栅叠加形成等效相移布拉格光栅, 光栅中间带宽为 0.035 nm, 凹陷为 8 dB, 见图 7。Pereira 等^[108]通过在相位掩模

板中心位置放置一个挡片, 直接制备得到相移布拉格光栅, 其传输损耗为 -16.3 dB 和 -13.2 dB (分别对应两个 dip), 此方法虽然简单, 但需要在相位掩模板上放置高精度的遮挡片。

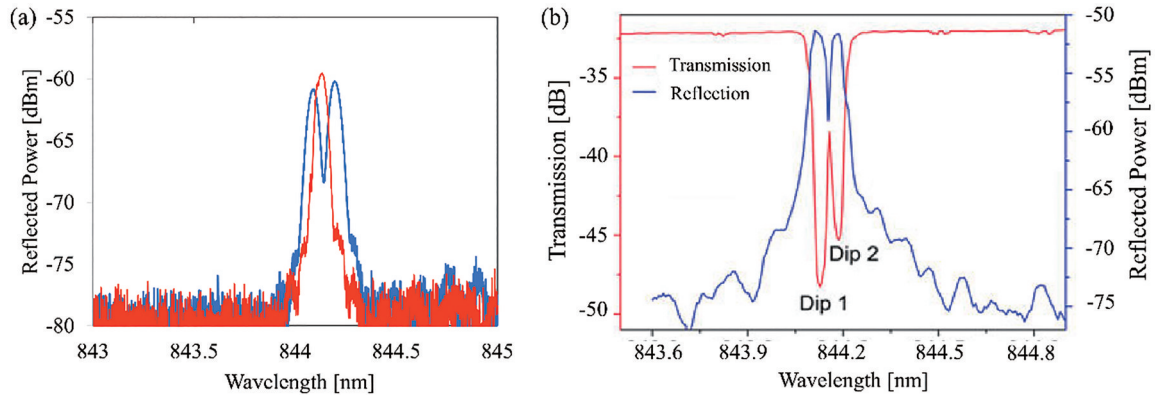


图 7 248 nm 激光制备相移布拉格光栅。(a)莫尔重叠法^[107];(b)中心窄带法^[108]

Fig. 7 PS-FBG fabrication by 248 nm irradiation. (a) Moiré overlapping^[107]; (b) narrow blocking in the center^[108]

4 聚合物光纤光栅的最新应用

4.1 传感领域的应用

由于聚合物光纤具有大应变极限、高断裂韧度、高柔韧性以及高应变敏感性,其传感方面的应用一直以来受到广泛的关注^[109]。对于物理量参数、生物量参数和化学量参数的传感监测应用,聚合物光纤有着明显的优势,而基于 POF 的光栅技术,具有提高传感精度和灵敏度的优势,是当前光纤传感领域的一个重要方向。本部分简要概述了近年来 POF 和 POFBG 在物理量参数、生物量参数以及化学量参数的监测应用。

4.1.1 物理量参数监测应用

物理量监测是 POF 的主要应用方向之一,POF 具有良好的柔韧性及亲生物性,在生物医学中对于监测物理量参数的应用具有广阔的前景。香港理工大学 Cheng 等^[92]将 Zeonex 聚合物光纤光栅嵌入到硅胶中,制备成长条形和片状的器件,并置于手腕和腹部,分别测量人体的脉搏和呼吸,如图(8)所示。由于硅胶具有非常好的柔韧性和黏附能力,测试不需要任何黏结,器件可以在测试时保持稳定。相比于石英光纤,该传感器测量的脉搏信号强度提高了 4 倍,达到了 4 pm;呼吸强度更是超过了 400 pm。另外,硅胶良好的柔性使得该类型的器件可以制成可穿戴设备。

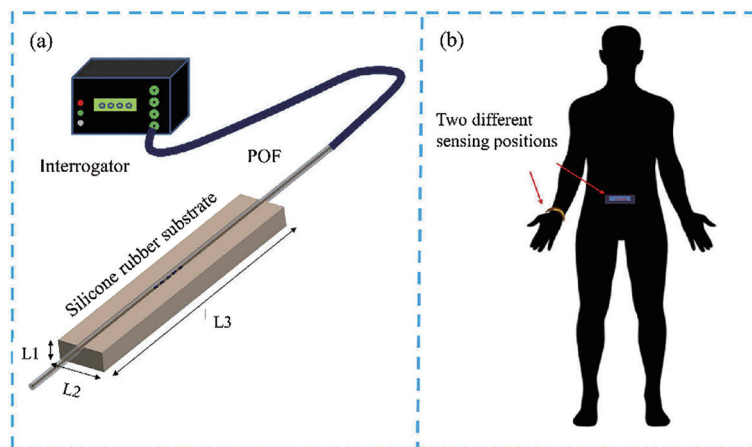


图 8 基于 Zeonex 聚合物光纤光栅的呼吸心率监测^[92]

Fig. 8 Respiratory heart rate monitoring based on Zeonex polymer fiber Bragg grating^[92]

Leal-Junior 等^[110]提出基于低损耗 CYTOP 聚合物光纤光栅阵列的医疗设备,利用飞秒激光刻写相邻位置具有 5 个不同波长的光栅,将光纤放置在医疗设备扶手位置,如图(9)所示,可以用于以下场景:1)结构健康监测;2)检测用户移动意图;3)步态节奏估计;

4)检测地板诱发的振动。与商用设备相比效果良好,实现了一种多功能紧凑节能的医疗检测系统。

生物医学中高精度准分布温度监测是目前的难点之一,线性啁啾聚合物布拉格光栅具有平坦的带宽,能够沿光栅长度对温度进行准分布探测,在

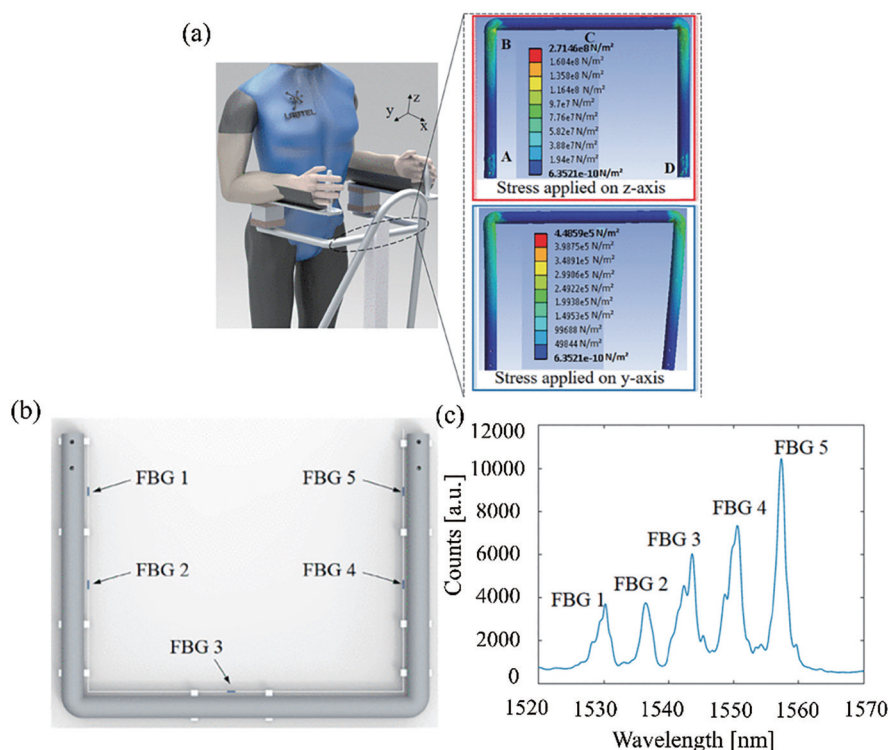


图 9 基于 CYTOP 聚合物光纤光栅阵列的医疗监测系统^[110]。(a)(b)扶手和光纤的位置;(c)光栅阵列反射谱示意图
Fig. 9 Medical monitoring system based on CYTOP polymer fiber Bragg grating array^[110]. (a) (b) Position of armrest and fiber;
(c) reflection spectrum of grating array

微创医疗中具有广泛的应用前景^[111]。如图 10 所示,啁啾聚合物布拉格光栅被放置在靠近射频治疗头的位置,尖端插入探测物体中,射频头与射频发生器相连,利用光学背散射反射计(LUNA-OBR-

4600)测量反射光谱,利用高斯模型估计温度准分布梯度。啁啾光纤布拉格光栅具有很高的灵敏度,可以通过光谱重建实现对空间非均匀温度的监测,在生物医学领域具有优势。

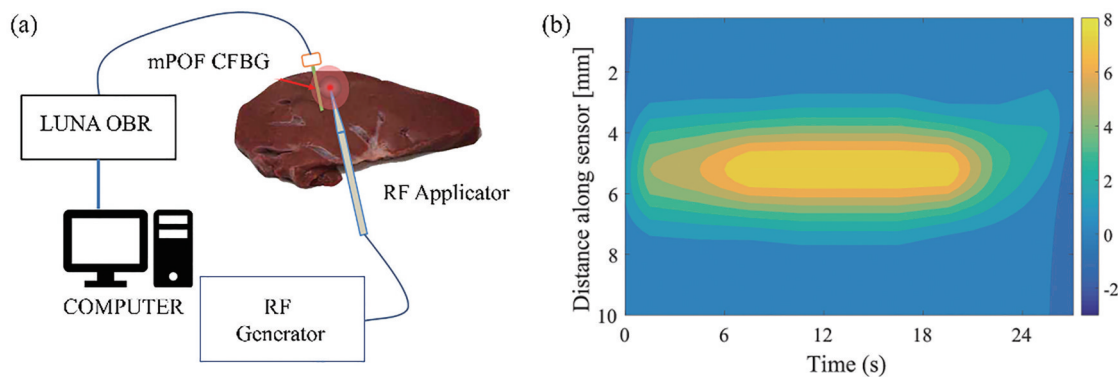
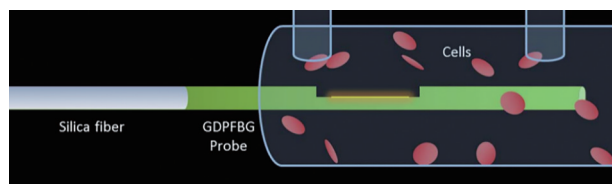


图 10 啁啾 POFBG 用于准分布温度测量^[111]。(a)系统示意图;(b)基于啁啾 POFBG 的高斯温度梯度图
Fig. 10 Chirped POFBG for quasi distributed temperature measurement^[111]. (a) System diagram; (b) chirped POFBG to measure
Gaussian temperature gradient

4.1.2 生物量参数监测应用

聚合物光纤由于光纤材料不同,展示的性能会有所差异,有些具有良好的生物兼容性,POF 在生物量参数监测上具有一定的优势,如重庆理工大学 Zhong 等^[112]制备了 D 型 POF 探针用于监测生物膜

厚度和溶液中的苯酚浓度,该探针由 D 型 POF 和掺 GeO₂ 的加拿大香脂涂层组成,用于监测生物膜的生长、液相成分及其浓度的变化。电子科技大学 Yao 等^[20]展示了一种新型的基于石墨烯的 D 形聚合物光纤光栅的生化探针传感器(如图 11 所示)。通过

图 11 石墨烯基聚合物光纤光栅探针示意图^[20]Fig. 11 Schematic diagram of the graphene based POFBG probe^[20]

在 POFBG 的 D 形横截面上覆盖石墨烯,提出并证明了一种基于 POFBG 检测人类红细胞(红细胞, RBCs)浓度的新型技术。这种聚合物光纤光栅不仅对周围红细胞具有高灵敏度(最大灵敏度超过 1 pm/ppm),而且结构紧凑,利于临床应用且具有良好的可恢复性、快速响应和鲁棒性。除了红细胞检测外,它还具有其他生物学和医学应用的潜力,如细胞动力学的研究,为高灵敏度的原位和体内细胞检测应用提供了检测平台。

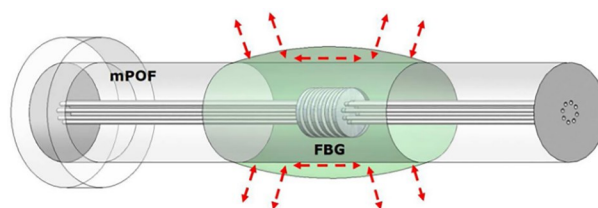
Zhang 等^[113]提出基于 POFBG 的新型生化浓度传感器,并通过监测盐水浓度证明其可行性,其主要原理是 POFBG 在不同湿度下的布拉格波长不同。作为浓度传感器,首先用水使 POFBG 充分膨胀,然后拔出并插入盐水的试管中进行测定。结果表明 POFBG 波长随着盐水浓度的变化而显著变化(随盐水浓度的增加而减小),且过程是可逆的,因此通过布拉格波长的变化可以实时监测溶液的浓度并可以利用它来制造生物化学传感器进行原位测量。

4.1.3 化学量参数监测应用

对于化学量参数监测,由于 POF 材料的多样性,光纤及涂层材料的选择广泛,在化学量参数监测中具有一定优势。如重庆理工大学 Zhong 等^[114]提出了一种高选择性光化学传感器,将 POF、Er³⁺: YAlO₃/SiO₂/TiO₂(EYST)和聚合物膜耦合用于水中苯酚浓度的检测。原理是苯酚的光催化降解提高了溶液的折射率和吸收率,灵敏度能达到 -0.195×10^{-3} mg/L。这种光化学传感器解决了传统 POF 传感器灵敏度低、非选择性和 pH 依赖性强的基本问题。

为了避免交叉反应,有时需要排除 pH 对光纤的干扰,但更多的是利用 POF 对 pH 的敏感性来制备基于 POFBG 的 pH 传感器。香港理工大学学者报道了一种基于 POFBG 的全聚合物 pH 传感器,该传感器是将紫外光固化的聚(乙二醇)二丙烯酸酯

(PEGDA)覆盖在聚合物光纤光栅上,其灵敏度高达 -0.41 nm/pH,平均响应时间约为 30 s^[19]。Janting 等^[115]提出了一种小型的全聚合物光纤布拉格光栅 pH 传感元件(如图 12 所示),其灵敏度优于同类基于 FBG 的 pH 传感器。将 pH 敏感水凝胶涂层置于 POFBG 上时,pH 值的变化会导致水凝胶膨胀或收缩,从而改变布拉格波长。该传感器是通过跟踪光纤应变引起的反射布拉格波长的变化来监测 pH 的变化。在涂覆水凝胶涂层之前,Janting 等^[115]将 mPOF 从 150 μ m 蚀刻至 80 μ m 来提高灵敏度,并使用丙酮和甲醇溶液(质量比为 1:1)处理表面来增强水凝胶在涂覆期间的铺展和固化后的附着力,最后获得了 73 μ m/pH 的精确度,响应时间低于 4.5 min。

图 12 小型全聚合物光纤布拉格光栅 pH 传感元件示意图^[115]Fig. 12 Schematic diagram of small all-polymer fiber Bragg grating pH sensor^[115]

4.2 通信领域的应用

传统石英光纤组成了现代的通信网络,其带宽高、衰减低等特点能很好地满足长距离通信的需求,但对于面向家庭的短通信系统,石英光纤芯径小导致光纤对接条件苛刻,柔韧性低易折断使其需要较厚的保护层且其弯曲程度不能过大,成本较高使其不利于大范围使用。随着对 POF 研究的深入,POF 的损耗率逐渐降低,已经可以满足短距离传输的要求。POF 具有以下优点:POF 价格低廉,易被人们接受;可塑性强,可以在相对狭窄的家庭空间内铺设;光纤耦合要求低,不需要专业人员也能进行对接操作;大容量,更能满足短通信领域对高带宽的要求。POF 的这些特点使其在短距离光通信领域极具竞争力。而在此基础上,POF 通过刻入光栅器件,可以达到特定的功能,如色散补偿^[116]、光信息调制^[96]和波分复用^[117]等。

Min 等^[116]基于微结构聚合物光纤啁啾布拉格光栅实现了可调谐色散补偿,如图 13 所示,研究了带宽为 0.11~4.86 nm 的反射谱变化,以及应变引起的群时延变化,可以看出该光栅实现了 513.6~11.15 ps/nm 的可调谐色散,在光通信和微波光子系统中具有潜在应用。

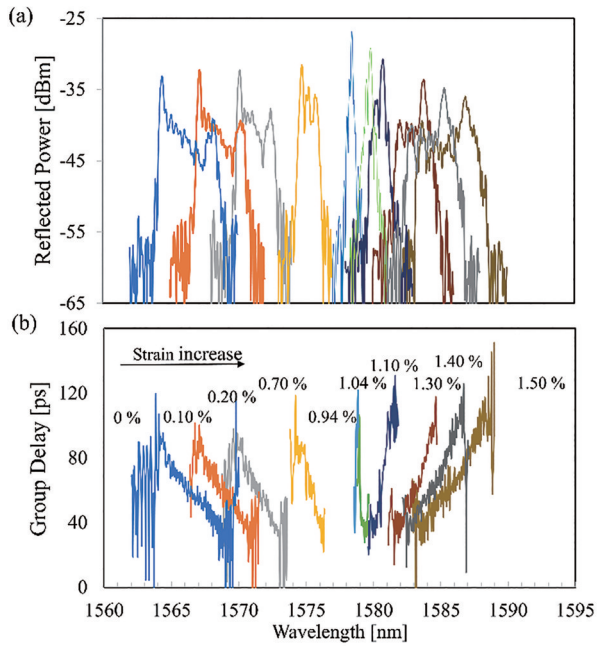


图 13 聚合物可调啁啾 FBG^[116]。(a)反射光谱功率与应变的关系；(b)群时延与应变的关系

Fig. 13 Tunable chirped POFBG^[116]. (a) Relationship between the reflected spectral power and the strain; (b) relationship between the group delay and the strain

光学调制器在现代光信息处理技术中发挥着越来越重要的作用。迄今为止,已经提出各种方法,以实现高效低能耗的片上光学调制器,然而片上光学调制器与光纤系统的连接难度较大。基于光纤的光学调制器可以解决这一问题,深圳大学 Liao 等^[96]提出一种新型全光学调制器,如图 14 所示,其基础元件是利用飞秒激光双光子聚合打印的聚合物纳米布拉格光栅,此器件具有 176 ns 的快速时间响应和 -45.43 pm/mW 的良好线性调制。

POF 适用于短距离家庭网络通信,POFBG 的另一项应用是实现基于 POF 的光波分复用技术(WDM POF),以提高传输容量。西班牙学者^[117]提出了一种紧凑、低成本的 POF 波分复用装置,该装置基于 PMMA mPOF 中两个重叠的光纤光栅,可用于密集波分复用(DWDM)和稀疏波分复用(CWDM)。

5 结束语

近年来聚合物光纤光栅器件的制备和应用取得了重大进展,本文综述了多种制备时间短、灵活性高、实用性强的光栅制备工艺,例如热水辅助梯度热退火法,利用该方法制备啁啾光纤光栅时,不需要特殊的相位掩模或额外的蚀刻,并且可以很容

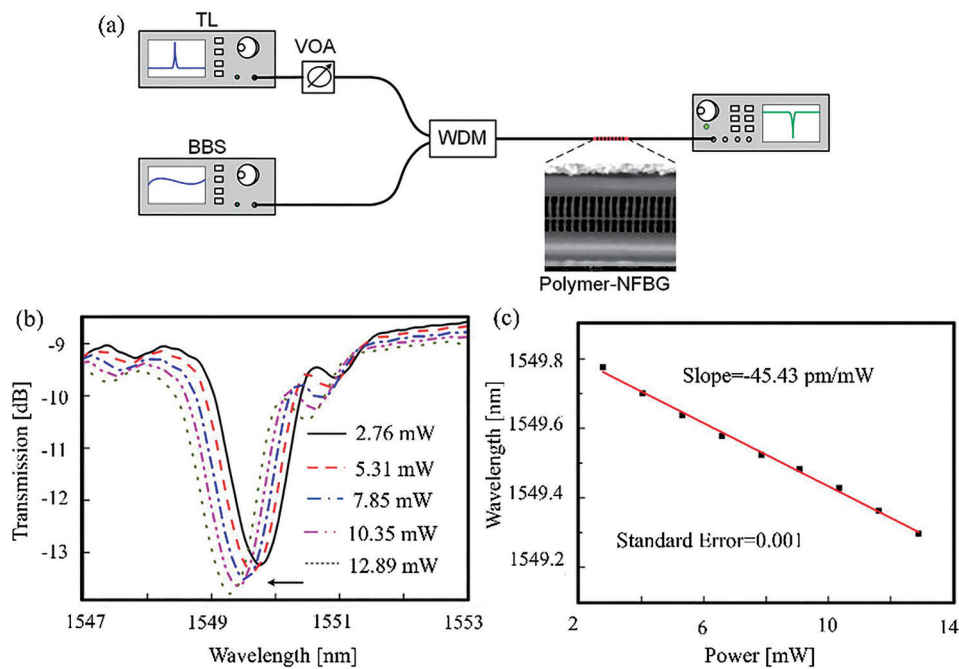


图 14 基于飞秒激光双光子聚合打印的聚合物纳米布拉格光栅的新型全光学调制器。(a)静态光泵浦测试系统；(b)传输光谱的变化；(c)布拉格谐振波长和泵浦功率之间的关系^[96]

Fig. 14 Novel all optical modulator of polymer nano Bragg grating based on femtosecond laser two-photon polymerization printing. (a) Static optical pumping test system; (b) change of transmission spectrum; (c) relationship between Bragg resonance wavelength and pump power^[96]

易地控制中心波长和啁啾特性的调谐。在传感领域,均匀布拉格光栅可用于 pH、温度、应变和分布式压力传感器,啁啾光纤布拉格光栅在生物医学领域可用于高分辨率热探测,相比于石英光纤光栅,聚合物光纤光栅具有更好的灵敏度和生物相容性,因此在生物医学传感和脑机接口领域具有非常巨大的潜在价值。另外,在光通信领域,聚合物光纤由于具有高传输容量和易于安装等优点,在家庭短距离互联方面具有优势。

综上所述,无论是传感领域还是短距离光通信领域,聚合物光纤光栅都表现出了良好的性能。然而,目前用于制作光栅器件的聚合物光纤大多数还没有进行商业化生产,不能投入实际应用。如何以更低的生产成本、更高的稳定性制作出高性能的聚合物光纤光栅是未来研究的一个重要方向。

参 考 文 献

- [1] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪,苑立波,田芊.中国光纤传感40年[J].光学学报,2018,38(3):0328001.
- [2] Shu Y J, Wu J, Zhou S L, et al. Evaluation method of ultimate sensing life for stress fatigued FBG strain sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 0106002.
舒岳阶,吴俊,周世良,等.FBG应变传感器应力疲劳极限传感寿命评估方法[J].光子学报,2018,47(1):0106002.
- [3] Liu R Z, Chen M, Zheng J J, et al. Study on preparation and properties of high temperature regenerated fiber Bragg gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 0706001.
刘日照,陈明,郑加金,等.高温热重生光纤布拉格光栅制备及其性能研究[J].光子学报,2020,49(7):0706001.
- [4] Yan D, Cheng N K, Tian Z, et al. Temperature sensor based on multicore fiber supermode interference [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0706007.
闫栋,陈南光,田振,等.基于多芯光纤超模干涉的温度传感器[J].激光与光电子学进展,2021,58(7):0706007.
- [5] Guo Y X, Yang Y H, Xiong L, et al. Response characteristics of fiber Bragg gratings embedded in soft materials with different Young's modulus for bending measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(8): 1634-1643.
郭永兴,杨跃辉,熊丽,等.植入光纤布拉格光栅的不同杨氏模量软体材料弯曲测量响应特性[J].光学精密工程,2020,28(8):1634-1643.
- [6] Luo B B, Zou W G, Zhao M F, et al. pH sensor based on fiber grating with extremely large tilt angle and its sensitivity enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106009.
罗彬彬,邹文根,赵明富,等.极大倾斜角度光纤光栅 pH 值传感器及其增敏研究[J].光学学报,2017,37(1):0106009.
- [7] Xin X, Wu Y W, Liu H M, et al. A new fabrication method of fiber Bragg grating hydrogen sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0406002.
辛鑫,吴永武,刘慧敏,等.一种新的光纤 Bragg 光栅氢气传感器制作方法[J].光学学报,2021,41(4):0406002.
- [8] Wang D, Ying K, Li W P, et al. Design and inscription of optical filters based on multi-phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2206002.
王迪,应康,李文屏,等.多相移光纤光栅滤波器的设计与制备[J].光学学报,2020,40(22):2206002.
- [9] Lü R D, Chen T, Fan C S, et al. Application of fiber lasers based on femtosecond laser inscribed fiber Bragg gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111426.
吕瑞东,陈涛,范春松,等.飞秒激光制备光纤 Bragg 光栅在光纤激光器中的应用[J].激光与光电子学进展,2020,57(11):111426.
- [10] Yang J M, Lin Y L, Huang Q Q, et al. Wavelength-tunable linearly polarized Yb-doped fiber laser based on tilted fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0314003.
杨锦民,林彦吕,黄千千,等.基于倾斜光栅的可调谐线偏振掺镱光纤激光器[J].光学学报,2020,40(3):0314003.
- [11] Zeng J H, Zhang P Q, Zhang Q, et al. Dispersion compensation of chirped fiber grating in chalcogenide fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1005007.
曾江辉,张培晴,张倩,等.啁啾光纤光栅在硫系光纤激光器中的色散补偿[J].红外与激光工程,2017,46(10):1005007.
- [12] Chu Z Z, You L B, Wang Q S, et al. Progress in fabrication of polymer optical fiber gratings[J]. Laser Technology, 2018, 42(1): 11-18.

- 褚状状, 游利兵, 王庆胜, 等. 聚合物光纤光栅制备进展[J]. 激光技术, 2018, 42(1): 11-18.
- [13] Peng G D, Xiong Z, Chu P L. Photosensitivity and gratings in dye-doped polymer optical fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 1999, 5(2): 242-251.
- [14] 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.
- [15] Lyu C G, Liu Z Q, Huo Z Q, et al. High-sensitivity, high-spatial-resolution distributed strain sensing based on a poly (methyl methacrylate) chirped fiber Bragg grating[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1134-1139.
- [16] Zubel M G, Fasano A, Woyessa G T, et al. Bragg gratings inscribed in solid-core microstructured single-mode polymer optical fiber drawn from a 3D-printed polycarbonate preform[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 12744-12757.
- [17] Gieraj A, Vagenende M, Filipkowski A, et al. Poly (D, L-lactic acid) (PDLA) biodegradable and biocompatible polymer optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(9): 1916-1923.
- [18] Theodosiou A, Min R, Leal-Junior A G, et al. Long period grating in a multimode cyclic transparent optical polymer fiber inscribed using a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5346-5349.
- [19] Cheng X, Bonafino J, Guan B O, et al. All-polymer fiber-optic pH sensor[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14610-14616.
- [20] Yao B C, Wu Y, Webb D J, et al. Graphene-based D-shaped polymer FBG for highly sensitive erythrocyte detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(22): 2399-2402.
- [21] Zhang Z F, Zhang C, Tao X M, et al. Inscription of polymer optical fiber Bragg grating at 962 nm and its potential in strain sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(21): 1562-1564.
- [22] Li C, Liao C R, Wang J, et al. Femtosecond laser microprinting of a polymer fiber Bragg grating for high-sensitivity temperature measurements[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3409-3412.
- [23] Peters K. Polymer optical fiber sensors: a review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(1): 013002.
- [24] Bilro L, Alberto N, Pinto J L, et al. Optical sensors based on plastic fibers[J]. *Sensors*, 2012, 12(9): 12184-12207.
- [25] Durana G, Poisel H, Zubia J, et al. Monitoring the vertical deflection of a flap rudder using a novel fibre optical strain sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(10): 3-7.
- [26] Babchenko A, Maryles J. Graded-index plastic optical fiber for deformation sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(7): 757-760.
- [27] Sequeira F, Duarte D, Bilro L, et al. Refractive index sensing with D-shaped plastic optical fibers for chemical and biochemical applications[J]. *Sensors*, 2016, 16(12): E2119.
- [28] Mizuno Y, Nakamura K. Brillouin scattering in polymer optical fibers: fundamental properties and potential use in sensors[J]. *Polymers*, 2011, 3(2): 886-898.
- [29] Mizuno Y, Nakamura K. Potential of Brillouin scattering in polymer optical fiber for strain-insensitive high-accuracy temperature sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 775329.
- [30] Zhong N B, Liao Q, Zhu X, et al. Temperature-independent polymer optical fiber evanescent wave sensor[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11508.
- [31] Zhong N B, Zhao M F, Liao Q, et al. Effect of heat treatments on the performance of polymer optical fiber sensor[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13394-13409.
- [32] Dobb H, Webb D J, Kalli K, et al. Continuous wave ultraviolet light-induced fiber Bragg gratings in few- and single-mode microstructured polymer optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3296-3298.
- [33] Sáez-Rodríguez D, Cruz J L, Johnson I, et al. Water diffusion into UV inscribed long period grating in microstructured polymer fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(7): 1169-1173.
- [34] Johnson I P, Kalli K, Webb D J. 827 nm Bragg grating sensor in multimode microstructured polymer optical fibre[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(17): 1217-1218.
- [35] Mollers I, Jager D, Gaudino R, et al. Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project POF-all[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(8): 58-68.
- [36] Koike Y, Asai M. The future of plastic optical fiber [J]. *NPG Asia Materials*, 2009, 1(1): 22-28.
- [37] Zubia J, Arrue J. Plastic optical fibers: an introduction to their technological processes and applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, 7(2): 101-140.
- [38] Polishuk P. Plastic optical fibers branch out[J]. *IEEE*

- Communications Magazine, 2006, 44(9): 140-148.
- [39] Koike Y, Inoue A. High-speed graded-index plastic optical fibers and their simple interconnects for 4K/8K video transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(6): 1551-1555.
- [40] Pinzón P J, Pérez I, Vázquez C. Visible WDM system for real-time multi-Gb/s bidirectional transmission over 50-m SI-POF[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(15): 1696-1699.
- [41] Osahon I N, Rajbhandari S, Popoola W O. Performance comparison of equalization techniques for SI-POF multi-gigabit communication with PAM-M and device non-linearities[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11): 2301-2308.
- [42] Forni F, Shi Y, Tran N C, et al. Multiformat wired and wireless signals over large-core plastic fibers for in-home network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3444-3452.
- [43] Webb D J. Fibre Bragg grating sensors in polymer optical fibres[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(9): 092004.
- [44] Luo Y H, Yan B B, Zhang Q J, et al. Fabrication of polymer optical fibre (POF) gratings[J]. Sensors, 2017, 17(3): 511.
- [45] Leal-Junior A G, Diaz C A R, Avellar L M, et al. Polymer optical fiber sensors in healthcare applications: a comprehensive review[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3156.
- [46] Broadway C, Min R, Leal-Junior A G, et al. Toward commercial polymer fiber Bragg grating sensors: review and applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2605-2615.
- [47] Berghmans F, Geernaert T, Baghdasaryan T, et al. Challenges in the fabrication of fibre Bragg gratings in silica and polymer microstructured optical fibres[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(1): 27-52.
- [48] Nogueira R, Oliveira R, Bilro L, et al. New advances in polymer fiber Bragg gratings[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 104-109.
- [49] Pont D. Du Pont risks much to gain much[J]. Chemical & Engineering News Archive, 1966, 44(22): 21-22.
- [50] Brown R G, Derick B N. Plastic fiber optics II: loss measurements and loss mechanisms[J]. Applied Optics, 1968, 7(8): 1565-1569.
- [51] Gries C A B T, Beckers M. Polymer optical fibres: fibre types, materials, fabrication, characterisation and applications[M]. Cambridgeshire: Woodhead Publishing, 2017.
- [52] Groh W. Overtone absorption in macromolecules for polymer optical fibers[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 1988, 189(12): 2861-2874.
- [53] Ziemann O, Krauser J, Zamzow P E, et al. POF handbook[M]. 2nd ed. Heidelberg: Springer, 2008.
- [54] Koike Y, Nihel E, Tanio N, et al. Graded-index plastic optical fiber composed of methyl methacrylate and vinyl phenylacetate copolymers[J]. Applied Optics, 1990, 29(18): 2686-2691.
- [55] Xia C M, Zhou G Y. Progress and prospect of microstructured optical fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170603.
夏长明, 周桂耀. 微结构光纤的研究进展及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170603.
- [56] Argyros A. Microstructured polymer optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(11): 1571-1579.
- [57] van Eijkelenborg M, Large M, Argyros A, et al. Microstructured polymer optical fibre[J]. Optics Express, 2001, 9(7): 319-327.
- [58] Startsev O V, Rudnev V P, Perov B V. Reversible moisture effects in the climatic ageing of organic glass [J]. Polymer Degradation and Stability, 1993, 39(3): 373-379.
- [59] Zhang W, Webb D J, Peng G D. Investigation into time response of polymer fiber Bragg grating based humidity sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1090-1096.
- [60] Luo Y H, Zhang Q J, Liu H Y, et al. Gratings fabrication in benzildimethylketal doped photosensitive polymer optical fibers using 355 nm nanosecond pulsed laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(5): 751-753.
- [61] Woyessa G, Fasano A, Markos C, et al. Low loss polycarbonate polymer optical fiber for high temperature FBG humidity sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(7): 575-578.
- [62] 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.
- [63] Yang D X, Yu J M, Tao X M, et al. Structural and mechanical properties of polymeric optical fiber[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 364(1/2): 256-259.
- [64] 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.
- [65] Johnson I P, Yuan W, Stefani A, et al. Optical fibre Bragg grating recorded in TOPAS cyclic olefin copolymer[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(4): 271-272.
- [66] 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.
- [67] Woyessa G, Fasano A, Markos C, et al. Zeonex microstructured polymer optical fiber: fabrication friendly fibers for high temperature and humidity insensitive Bragg grating sensing[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(1): 286-295.
- [68] Koike Y. *Fundamentals of plastic optical fibers*[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014.
- [69] Li Z C, Tam H Y, Xu L X, et al. Fabrication of long-period gratings in poly (methyl methacrylate-co-methyl vinyl ketone-co-benzyl methacrylate)-core polymer optical fiber by use of a mercury lamp[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10): 1117-1119.
- [70] Dash J N, Cheng X, Tam H Y. Low gas pressure sensor based on a polymer optical fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 933-936.
- [71] 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.
- [72] Xu X S, Ming H, Zhang Q J. Properties of polarized laser-induced birefringent gratings in azobenzene-doped poly (methyl methacrylate) optical fibers[J]. *Optics Communications*, 2002, 204(1/2/3/4/5/6): 137-143.
- [73] Hiscocks M P, van Eijkelenborg M A, Argyros A, et al. Stable imprinting of long-period gratings in microstructured polymer optical fibre[J]. *Optics Express*, 2006, 14(11): 4644-4649.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] Sáez-Rodríguez D, Nielsen K, Bang O, et al. Photosensitivity mechanism of undoped poly (methyl methacrylate) under UV radiation at 325 nm and its spatial resolution limit[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3421-3424.
- [77] Sáez-Rodríguez D, Nielsen K, Bang O, et al. Time-dependent variation of fiber Bragg grating reflectivity in PMMA-based polymer optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1476-1479.
- [78] Hu X, Kinet D, Mégret P, et al. Control over photo-inscription and thermal annealing to obtain high-quality Bragg gratings in doped PMMA optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 2930-2933.
- [79] Yuan W, Stefani A, Bache M, et al. Improved thermal and strain performance of annealed polymer optical fiber Bragg gratings[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 176-182.
- [80] Stefani A, Stecher M, Town G E, et al. Direct writing of fiber Bragg grating in microstructured polymer optical fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(13): 1148-1150.
- [81] Hu X H, Kinet D, Chah K, et al. Bragg grating inscription in PMMA optical fibers using 400-nm femtosecond pulses[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2794-2797.
- [82] Luo Y H, Li Z C, Zheng R S, et al. Birefringent azopolymer long period fiber gratings induced by 532 nm polarized laser[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(12): 2348-2353.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] Liu H Y, Peng G D, Chu P L. Polymer fiber Bragg gratings with 28-dB transmission rejection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(7): 935-937.
- [86] 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.
- [87] Pereira L, Min R, Hu X H, et al. Polymer optical fiber Bragg grating inscription with a single Nd:YAG laser pulse[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18096-18104.
- [88] Marques C, Leal-Junior A G, Min R, et al. Advances on polymer optical fiber gratings using a

- KrF pulsed laser system operating at 248 nm[J]. *Fibers*, 2018, 6(1): 13.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] Marques C A F, Min R, Leal Junior A, et al. Fast and stable gratings inscription in POFs made of different materials with pulsed 248 nm KrF laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2013-2022.
- [92] Cheng X, Gunawardena D S, Pun C F J, et al. Single nanosecond-pulse production of polymeric fiber Bragg gratings for biomedical applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33573-33583.
- [93] Min R, Pereira L, Paixão T, et al. Inscription of Bragg gratings in undoped PMMA mPOF with Nd:YAG laser at 266 nm wavelength[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38039-38048.
- [94] Song Z Q, Qi H F, Peng G D, et al. Research on fabrication technology of fiber Bragg grating by phase mask moving[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(7): 1294-1297.
宋志强, 祁海峰, 彭纲定, 等. 利用动态相位掩模板法制作光纤光栅[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(7): 1294-1297.
- [95] 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.
- [96] Liao C R, Li C, Wang C, et al. High-speed all-optical modulator based on a polymer nanofiber Bragg grating printed by femtosecond laser[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(1): 1465-1473.
- [97] Xiao P, Liu T, Feng F R, et al. Spectral tuning of the diameter-dependent-chirped Bragg gratings written in microfibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29749-29759.
- [98] Guo T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328006.
郭团. 等离子体共振光纤光栅生物传感器综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328006.
- [99] Jiang Y J, Yuan Y, Xu J, et al. Phase-shifted fiber Bragg grating inscription by fusion splicing technique and femtosecond laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86: 236-241.
- [100] Hu X H, 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.
- [101] Hu X H, Mégret P, Caucheteur C. Surface plasmon excitation at near-infrared wavelengths in polymer optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3998-4001.
- [102] Liu H B, Liu H Y, Peng G D, et al. Tunable dispersion using linearly chirped polymer optical fiber Bragg gratings with fixed center wavelength[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(2): 411-413.
- [103] Marques C A F, Antunes P, Mergo P, et al. Chirped Bragg gratings in PMMA step-index polymer optical fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(6): 500-503.
- [104] Theodosiou A, Hu X H, Caucheteur C, et al. Bragg gratings and Fabry-Perot cavities in low-loss multimode CYTOP polymer fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(9): 857-860.
- [105] Min R, Ortega B, Marques C. Fabrication of tunable chirped mPOF Bragg gratings using a uniform phase mask[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4411-4420.
- [106] Min R, Ortega B, Broadway C, et al. Hot water-assisted fabrication of chirped polymer optical fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34655-34664.
- [107] Min R, Marques C, Bang O, et al. Moiré phase-shifted fiber Bragg gratings in polymer optical fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 41: 78-81.
- [108] Pereira L M, Pospori A, Antunes P, et al. Phase-shifted Bragg grating inscription in PMMA microstructured POF using 248-nm UV radiation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(23): 5176-5184.
- [109] Theodosiou A, Kalli K. Recent trends and advances of fibre Bragg grating sensors in CYTOP polymer optical fibres[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102079.
- [110] Leal-Junior A G, Frizzera A, Theodosiou A, et al. Plane-by-plane written, low-loss polymer optical fiber Bragg grating arrays for multiparameter sensing in a smart walker[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(20): 9221-9228.
- [111] Korganbayev S, Min R, Jelbuldina M, et al. Thermal profile detection through high-sensitivity

- fiber optic chirped Bragg grating on microstructured PMMA fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(20): 4723-4729.
- [112] Zhong N B, Zhao M F, Zhong L C, et al. A high-sensitivity fiber-optic evanescent wave sensor with a three-layer structure composed of Canada balsam doped with GeO_2 [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 85: 876-882.
- [113] Zhang W, Webb D, Peng G D. Polymer optical fiber Bragg grating acting as an intrinsic biochemical concentration sensor[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(8): 1370-1372.
- [114] Zhong N B, Chen M, Chang H X, et al. Optic fiber with $\text{Er}^{3+} : \text{YAlO}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ coating and polymer membrane for selective detection of phenol in water [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 273: 1744-1753.
- [115] Janting J, Pedersen J K M, Woyessa G, et al. Small and robust all-polymer fiber Bragg grating based pH sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4480-4486.
- [116] Min R, Korganbayev S, Molardi C, et al. Largely tunable dispersion chirped polymer FBG[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5106-5109.
- [117] Sáez-Rodríguez D, Nielsen K, Bang O, et al. Compact multichannel demultiplexer for WDM-POF networks based on spatially overlapped FBGs[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(8): 635-637.