

有机聚合物光波导的研究进展

侯有军

华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510641

摘要 与无机半导体光波导相比,有机聚合物光波导具有易于加工和方便集成的明显优势。总结了有机聚合物光波导的研究现状,包括聚合物光波导材料的分类和制备。重点总结了聚合物平面波导和聚合物微结构光纤波导的应用现状。对聚合物光波导的前景进行了展望,并提出了一些建议。

关键词 集成光学; 聚合物光波导; 聚合物微结构光纤; 聚合物平面波导; 光学集成器件

中图分类号 TN252; O631.2+4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.050005

Study Progress of Organic Polymeric Optical Waveguides

Hou Youjun

*School of Materials Science & Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510641, China*

Abstract Compared with inorganic semiconductor optical waveguides, organic polymer waveguides have obvious advantages such as easy processing and convenient integration. Research status of organic polymer optical waveguides is summarized, where the material classification and the fabrication of polymer optical waveguides are included. The application status of polymer planar optical waveguides and polymer microstructured fiber waveguides is mainly summarized. The prospect of polymer optical waveguides is discussed, and some suggestions are put forward.

Key words integrated optics; polymer optical waveguides; polymer microstructured fiber; polymer planar waveguides; optical integrated devices

OCIS codes 130.5460; 230.7370; 160.5140; 160.3130; 160.5470

1 引言

信息时代下,人们对数据传输性能的要求越来越高。在长距离有线通信领域,光纤通信技术能够满足高性能的需求。随着通讯技术的飞速发展,短距离信息传输对通讯器件体积、成本和集成化的要求越来越高。而传统的电互连和电子器件具有高损耗、低带宽、存在固有电磁干扰等缺点,限制了数据传输性能的进一步提升。光波导作为光信号通道,较电信通道具有低损耗、高带宽、抗电磁干扰、低能耗、低串扰、小物理尺寸等优点。光互连因此成为解决高速电信号互连瓶颈的一个有效方法,早已成为关注和研究的焦点。传统的光波导材料采用铌酸锂(LiNbO_3)或硅基半导体等无机材料作为光传输介质,而有机聚合物光波导因其具有易于加工、方便集成的优势逐渐成为研究的热点。为深入了解有机聚合物光波导的发展现状和趋势,本文对国内外有机聚合物光波导的材料分类、制备和应用等方面的研究进展进行了较为详细的综述。

2 聚合物波导材料的分类

适用于制作光波导的有机聚合物应满足:1) 在传统光通讯波长($1.3\ \mu\text{m}$ 或 $1.55\ \mu\text{m}$)处的吸收损耗和双折射较小;2) 热稳定性较高;3) 芯层材料折射率各向同性且易于调节;4) 成膜性良好,薄膜表面平整光滑;

收稿日期: 2016-11-16; 收到修改稿日期: 2016-12-21

作者简介: 侯有军(1971—),男,博士,讲师,主要从事高分子材料的功能化与快速成型方面的研究。

E-mail: yjhou@scut.edu.cn

5) 固化温度适中;6) 多层波导的化学特性、固化温度和层间应力均要匹配,以防止引入层间缺陷和光损耗。

按照聚合物光波导材料的发展阶段,可将聚合物分为传统光学聚合物和新型光学聚合物;按照聚合物材料的固化方式,可将其分为热塑性材料、热固性材料和光固化材料。

2.1 传统光学聚合物

传统的光学聚合物主要包括聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚苯乙烯(PS)、聚碳酸酯(PC)、聚氨酯(PU)和环氧树脂等,其具有原料易得、制备简单、成本低、透明性好、光损耗小等优点,自 20 世纪 70 年代开始用作光波导材料,其制备技术迄今已经十分成熟。几种传统光学聚合物的物理特性见表 1,其中 T_g 为玻璃化转变温度。

表 1 传统光学聚合物的特性
Table 1 Properties of conventional optical polymers

Material	Refractive index n	$T_g / ^\circ\text{C}$	Loss / (dB/cm)
PMMA	1.49	105	0.2 (850 nm)
PS	1.59	100	0.2 (672 nm)
PC	1.58	145	0.3 (850 nm)
PU	1.56	—	0.8 (633 nm and 1064 nm)
Epoxy resin	1.58	250	0.3 (633 nm), 0.8 (1064 nm)

2.2 新型光学聚合物

传统光学聚合物多为热塑性材料,存在热稳定性差、折射率不易调节、在光通讯波段吸收损耗偏高等缺陷,限制了其在光通讯波段的广泛应用。国内外研究者开发了许多新型的光学聚合物,有些甚至实现了商品化。这类新型光学聚合物主要是低传输损耗聚合物,如 PMMA 衍生出来的氟代/氘代聚甲基丙烯酸酯、耐高温聚酰亚胺(PI)的氟代衍生物、交联含氟聚芳醚、氟代聚硅氧烷、含氟聚酯类以及光刻胶材料等。

2.2.1 氟代/氘代聚甲基丙烯酸酯

PMMA 在可见光波段透光性优异,被广泛应用于塑料光纤和光学透镜等的制作。但在近红外波段中,PMMA 中亚甲基和甲基的 C—H 耦合吸收,使吸收峰较宽,峰位恰好在 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 附近。但如果分子结构中的部分或全部氢原子被氘或氟取代,其在通讯波段的传输损耗会降低。Yoshimura 等^[1]对单体甲基丙烯酸甲酯(MMA)、全氘代甲基丙烯酸甲酯[d-MMA,化学结构如图 1(a)所示]和氟化全氘代甲基丙烯酸烷基酯[d-FMA,化学结构如图 1(b)所示]进行了研究,其吸收光谱如图 1(c)所示;采用低折射率的 d-PFMA 为皮层,分别以 PMMA 和氘代 PMMA(d-PMMA)为芯层,得到的吸收光谱如图 1(d)所示,可以看出氟或氘代替氢后材料在通讯波段的传输损耗明显降低。

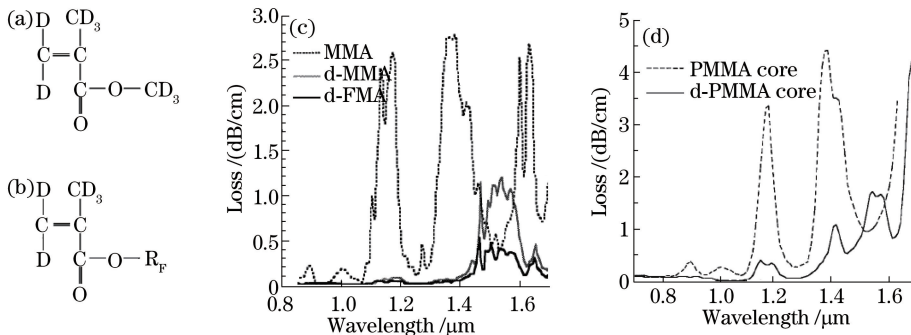


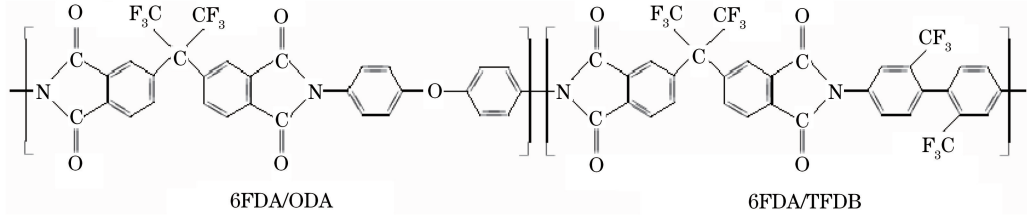
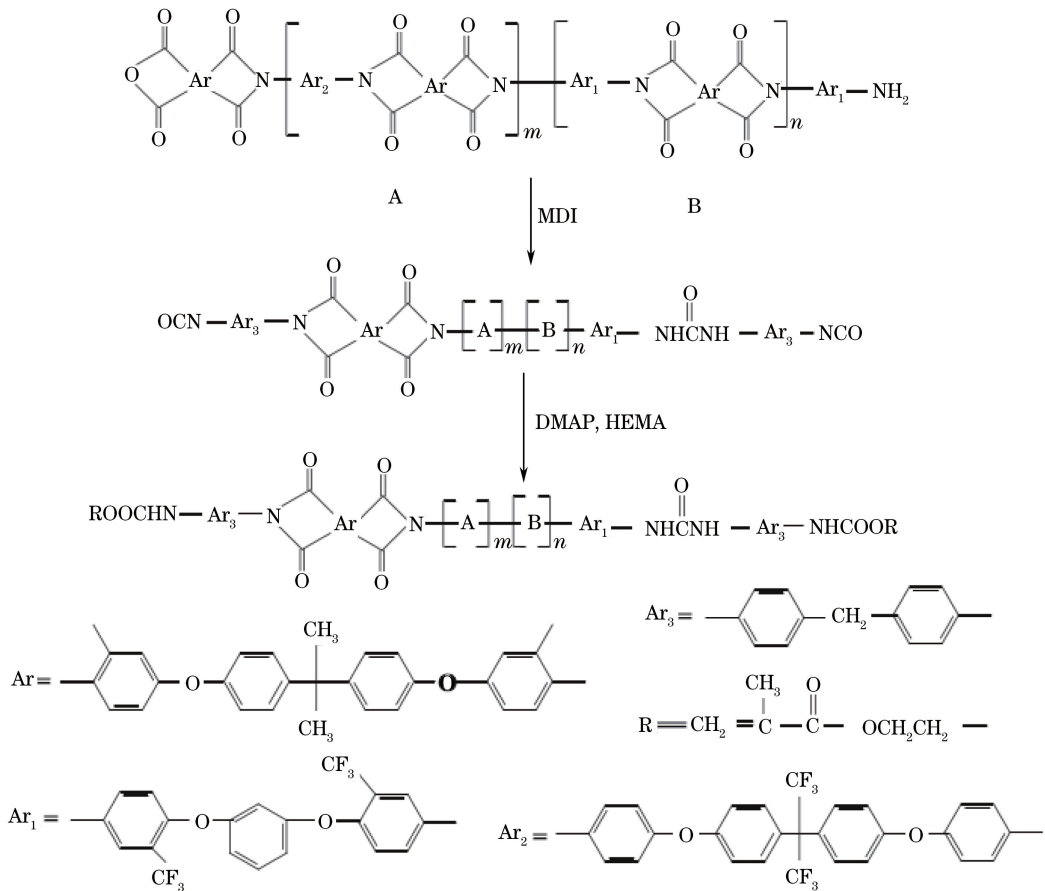
图 1 (a) d-MMA 的化学结构;(b) d-FMA 的化学结构;(c) MMA、d-MMA 和 d-FMA 的吸收谱;
(d)以 PMMA、d-PMMA 为芯层时的吸收谱^[1]

Fig. 1 (a) Chemical structure of d-MMA; (b) chemical structure of d-FMA; (c) absorption spectra of MMA, d-MMA and d-FMA; (d) absorption spectra when PMMA and d-PMMA taken as core layers^[1]

2.2.2 含氟 PI

在 PI 分子结构中引入氟及含氟取代基可得到含氟聚酰亚胺(f-PI)。f-PI 的耐热温度可达 $380 ^\circ\text{C}$,近红外传输损耗约为 0.3 dB/cm 。其折射率与含氟量成反比, T_g 高,介电常数低,膨胀系数低,溶解性好,成本

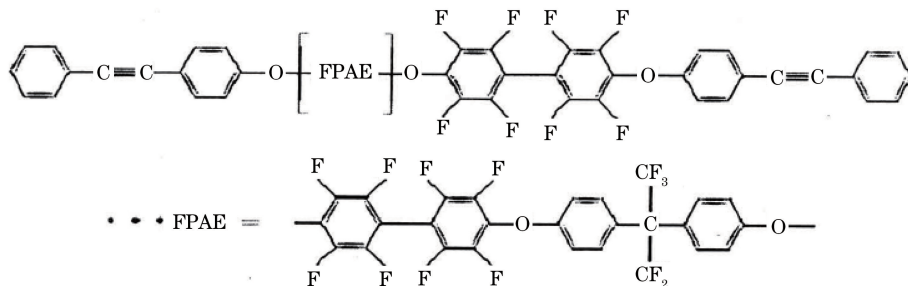
低,目前已商品化。典型的商品化 f-PI 为日本电信电话株式会社(NTT)开发的 FLU PI 和 FLU PI-CB^[2],其中 FLU PI-CB 的结构式如图 2 所示,6FDA 为 4,4'-(六氟异丙基)双邻苯二甲酸酐,ODA 为二氨基二苯醚,TFDB 为 2,2'-二(三氟甲基)-4,4'-联苯二胺。Wang 等^[3]分别合成了耐热性优异的可交联型和非交联型 f-PI(CLFPI 和 NCFPI,其中 CLFPI 结构式如图 3 所示,MDI 为二苯甲烷二异氰酸酯,DMAP 为 4-二甲氨基吡啶,HEMA 为甲基丙烯酸羟乙酯),其 T_g 为 198 °C,热分解温度(T_d)超过 500 °C;制备的 f-PI 波导具有极低的光传输损耗,在 1.31 μm 和 1.55 μm 处的损耗分别为 0.2 dB/cm 和 0.36 dB/cm。

图 2 FLU PI-CB 的化学结构^[2]Fig. 2 Chemical structure of FLU PI-CB^[2]图 3 CLFPI 的化学结构^[3]Fig. 3 Chemical structure of CLFPI^[3]

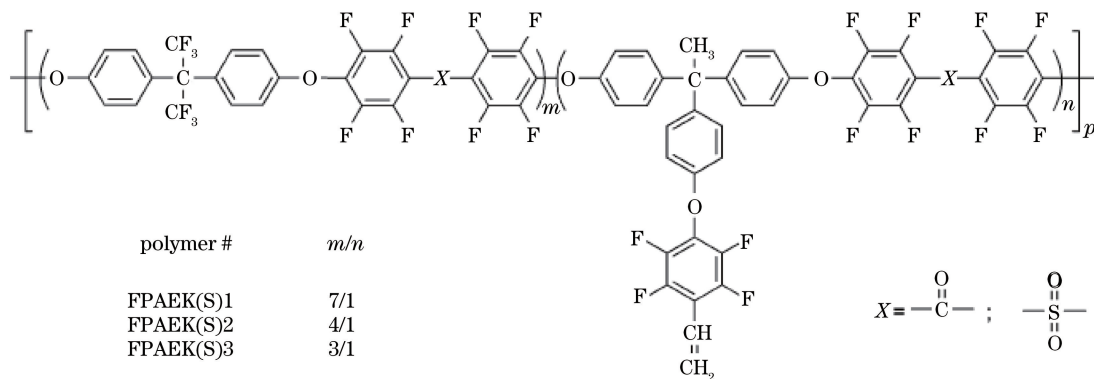
2.2.3 含氟聚芳醚/聚芳醚酮/聚芳醚砜

分子主链中含大量芳环的聚芳醚(PAE)、聚芳醚酮(PAEK)或聚芳醚砜(PAES),因其刚性结构而具有很高的热稳定性,经氟化处理是一种优良的光波导材料。

Lee 等^[4]通过在含氟聚芳醚中引入二苯乙炔端基合成出可交联的聚芳醚,如图 4 所示,其分子中氟的摩尔分数大于 60%,近红外波段透射率很高,在 1.55 μm 处传输损耗小于 0.2 dB/cm, T_d 高达 510 °C,并可通过改变分子量使折射率在 1.495~1.530 范围内调节。

图 4 可交联型全氟聚芳醚(FPAE)的化学结构^[4]Fig. 4 Chemical structure of cross-linkable fully-fluorinated polyarylether (FPAE)^[4]

Qi 等^[5]合成了一系列的 FPAEK 和 FPAES, 结构式如图 5 所示, 并成功制备了性能优良的直波导条。该聚合物具有良好的溶解性、较高的 T_g (150~185 °C) 和 T_d (480 °C), 而且既可以热交联又可以紫外光(UV)交联, 交联后在 1.55 μm 处的光损耗小于 0.5 dB/cm。

图 5 可交联型含氟 FPAEK 和 FPAES 的化学结构^[5]Fig. 5 Chemical structures of cross-linkable fluorinated FPAEK and FPAES^[5]

2.2.4 含氟聚硅氧烷

聚硅氧烷中含有(—Si—O—)主链, 具有比普通(—C—C—)主链聚合物更优异的热稳定性, 是耐热型光波导材料的另一种选择。为了减少聚硅氧烷在近红外区域的传输损耗, 需要利用氘或氟来取代聚硅氧烷分子链中的氢。张军志^[6]以二苯基硅二醇、十二氟庚基丙基三甲氧基硅烷、甲基丙烯酸氧丙基三甲氧基硅烷为前驱体, 经溶胶-凝胶法制备出了含氟聚硅氧烷树脂, 如图 6 所示, 其中 OMe—为甲氧基。其折射率为 1.52, 1.55 μm 波长处的光损耗降低到了 0.36 dB/cm, 经 UV 固化和热固化后含氟聚硅氧烷的 T_d 在 250 °C 以上, 表现出良好的耐热性能。

2.2.5 光刻胶材料

直接用光刻胶来制作光波导器件, 既能减少制作步骤又能降低制作费用。Tung 等^[7]利用商品化的光刻胶 SU-8 制备光波导器件, 如图 7 所示。可以看出, 光刻胶 SU-8 的主体聚合物为双酚 A 型酚醛环氧树脂。Zhao 等^[8]利用经染料分散红 1(DR1) 掺杂的光刻胶 SU-8 为芯层, 以光学粘合剂 NOA61 为包层, 经 UV 光刻技术制备了一种纳秒响应的光波导电光开关, 其在 1.55 μm 波长的光损耗为 2.5 dB/cm。

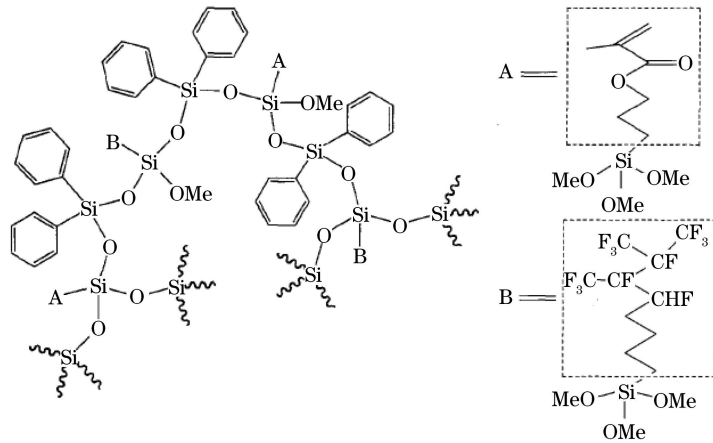
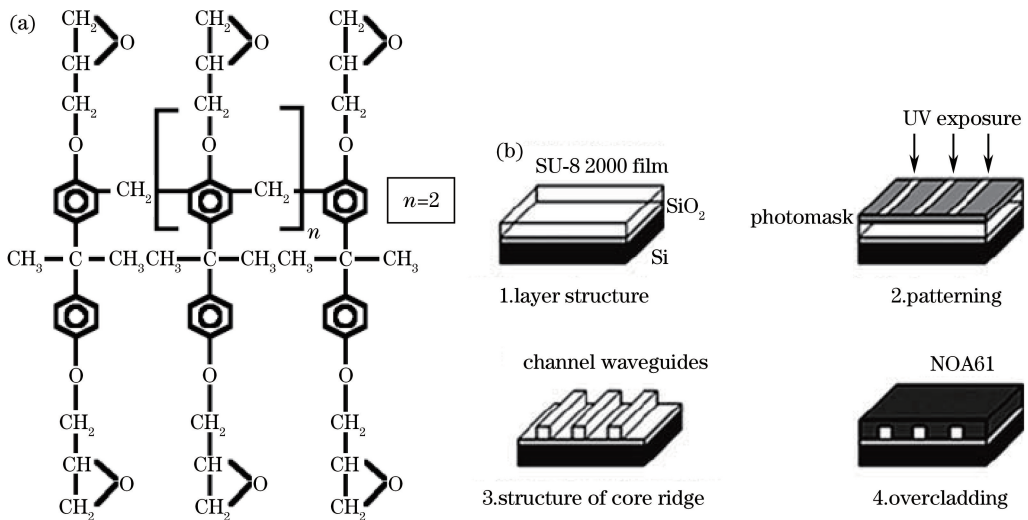
3 聚合物光波导的制备

3.1 聚合物平面波导的制备

通常来说, 聚合物平面光波导的制作方法包括光刻胶模板法、直接光刻法和软光刻法。

3.1.1 光刻胶模板法

光刻胶模板法是制作聚合物光波导的传统方法, 其典型的制作方法如图 8 所示^[9]。其步骤如下: 1) 在硅(Si)基底上先旋涂聚合物包层底膜, 再依次旋涂聚合物芯层和隔离层, 最后旋涂一层正性光刻胶; 2) 在掩

图 6 含氟聚硅氧烷的化学结构^[6]Fig. 6 Chemical structure of fluorinated polysiloxane^[6]图 7 (a)光刻胶 SU-8 的分子结构;(b)光波导的制备工艺^[7]Fig. 7 (a) Molecular structure of SU-8 photoresist; (b) fabrication process of optical waveguide^[7]

模板下经 UV 曝光和显影,得到所需的光刻胶图案;3) 经反应离子刻蚀(RIE)得到所需图案的聚合物芯层;4) 在芯层上面再旋涂聚合物包层顶膜,得到聚合物光波导。

3.1.2 直接光刻法

对于感光性的高分子材料,可以用紫外光(UV)、激光等直接写入的工艺来制作光波导器件,无需光刻胶模板,省去了光刻胶成型、离子刻蚀等复杂的工艺过程。这一制作工艺为制作大面积的器件提供了良好的技术平台。Singhal 等^[10]以光刻胶 SU-8 作为光波导芯层,以 NOA61 为包层,SU-8 经 UV 固化制作成单模条波导,无需离子刻蚀,如图 9 所示,该方法又被称为平板影印法。Kruse 等^[11]则直接利用紫外光直写(LDW)技术制作了单模聚合物光波导结构,无需使用掩模板,如图 10 所示。而利用飞秒激光直写(FsLDW)技术制备聚合物光波导结构,即利用透明介质对超短脉冲激光吸收的非线性过程以及激光聚焦的能量高度局域性来实现其他方式无法得到的三维波导结构。FsLDW 技术根据制备原理的不同又可分为直接诱导透明聚合物介质内部折射率改变^[12-13]和直接引发双光子聚合反应^[14]两种波导制备方法。

光漂白是另一种非常有效的直接光刻法^[15],对于含有染色基团的材料(如电光聚合物体系)十分有效。还可以使用电子束直接写入^[16]实现高分辨率图案的制作,以制作复杂的光学器件,如热光调制解调器等。

3.1.3 软光刻法

近几年,软光刻技术也被应用到了光波导器件的制作中。其基本步骤为:在图案化的硅模板上注入聚二

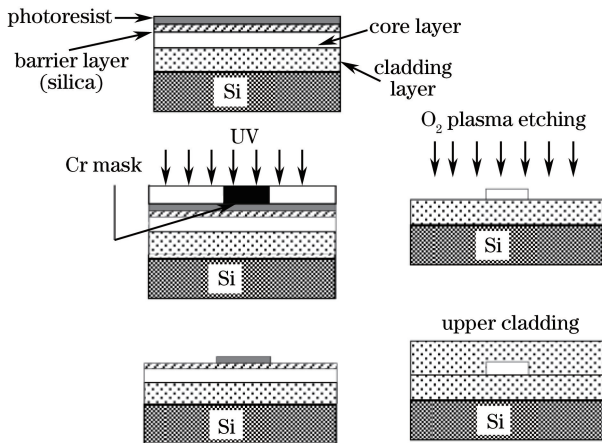


图 8 光刻胶模板法制备聚合物光波导的工艺步骤^[9]

Fig. 8 Process steps for preparing polymeric waveguides with photoresist-template method^[9]

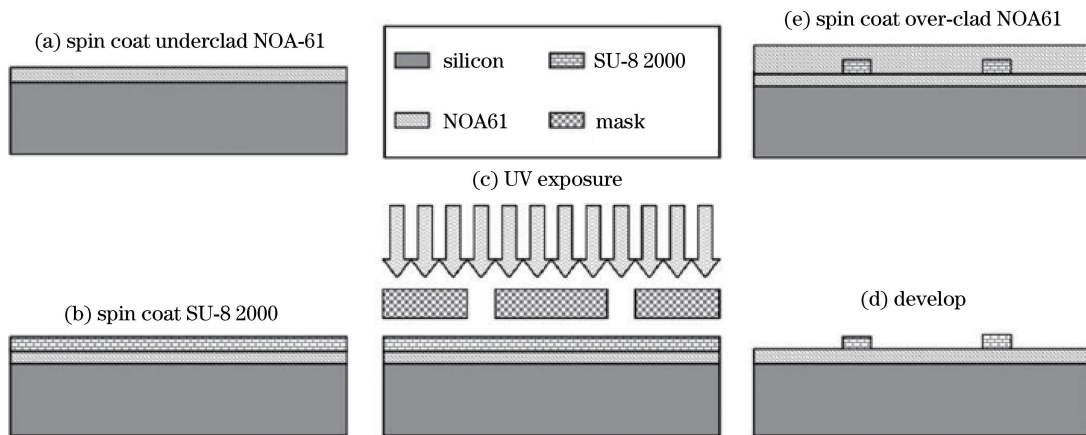


图 9 直接光刻法制备聚合物光波导的工艺步骤^[10]

Fig. 9 Process steps for preparing polymeric waveguides with direct-lithography method^[10]

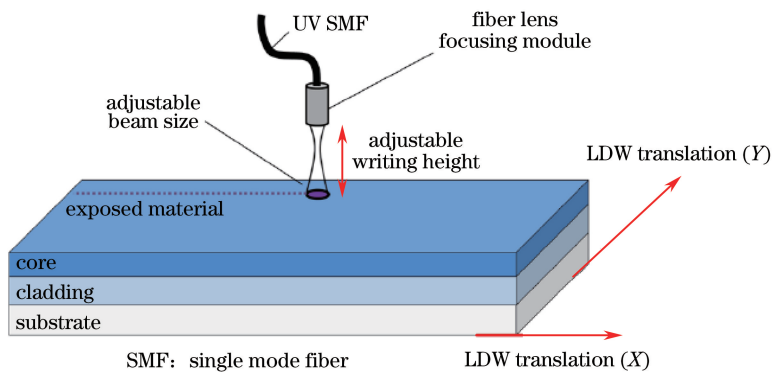


图 10 LDW 工艺示意图^[11]

Fig. 10 Schematic diagram of LDW technology^[11]

甲基硅氧烷(PDMS),成型后得到 PDMS 柔性印模,然后利用 PDMS 模板通过压印等一系列方法,灵活地在不同基底上复制出预期图案的光波导。软光刻法制作 PDMS 印模及压印聚合物光波导的详细步骤如图 11 所示^[17]。

3.2 聚合物微结构光纤的制备

微结构光纤(MOF)是近些年发展起来的一种新型光纤波导器件,其最大的特点是沿着光纤的轴向有规律地排列着许多空气孔,这些空气孔引起光纤横截面上折射率的复杂变化。聚合物微结构光纤(MPOF)是

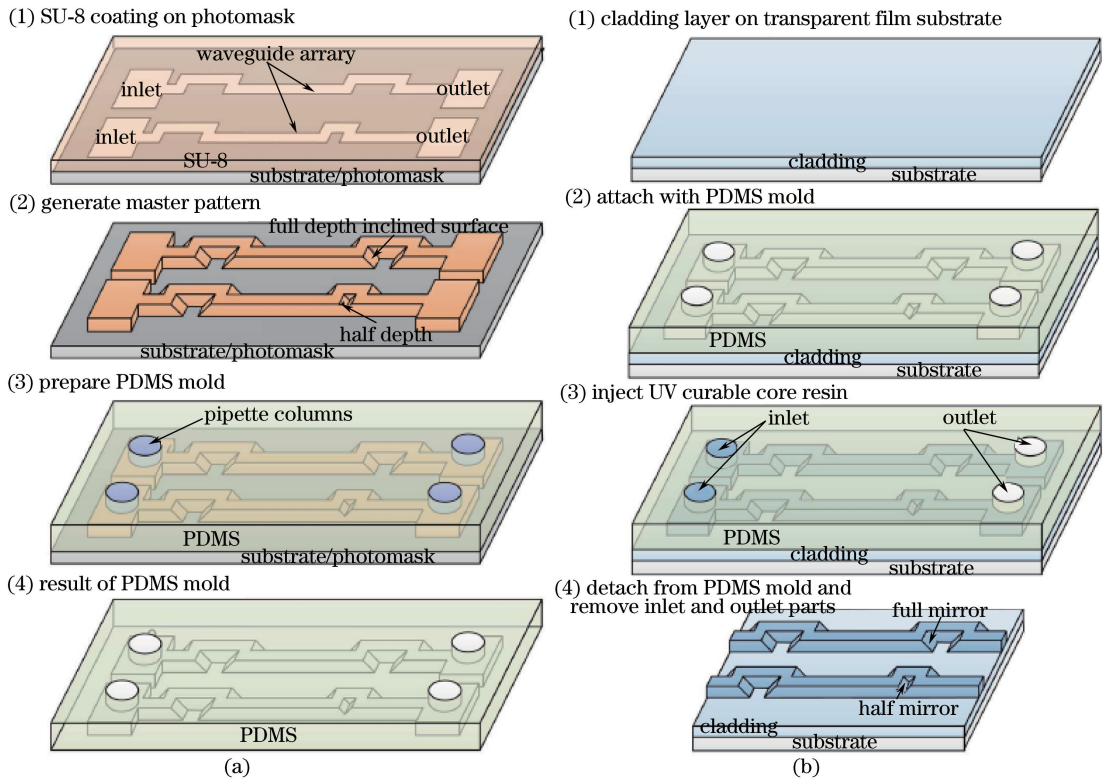


图 11 (a) PDMS 印模制备工艺和(b)聚合物光波导压印过程的示意图^[17]

Fig. 11 Schematic illustration of (a) PDMS-moulage preparation technology and

(b) polymeric optical waveguide imprint process^[17]

以聚合物为基本材料制备的微结构光纤,与石英光纤相比,它具有高柔韧性、制备和拉丝温度相对较低、成本低廉等特点,已经成为光纤技术的重要组成部分。目前 MPOF 的制作方法很多,可以通过堆积法^[18]、钻孔法^[19]、挤出法^[20]、浇注法^[21]等预先制作 MPOF 预制棒,然后通过特定的拉伸成纤工艺来获得一定细度的 MPOF。但是总体来说,目前 MPOF 的制作工艺还不成熟,特别是在复杂结构成型、微结构保持、规模化生产等方面还存在许多问题和不足。

4 聚合物光波导材料的应用研究

由于具有易于加工和方便集成两大优势,聚合物光波导材料在芯片光互连、光分束器/组合器/定向耦合器、复用器/解复用器、光开关/调制器、可调谐滤波器/衰减器、放大器、激光器、传感器等领域的应用研究备受关注。目前,越来越多的研究者利用聚合物光波导材料制作出了高集成光学器件和线路。

4.1 光互连波导与光电印制电路板

光互连通过光信号把光源、互连通道、接收器等部分连成一体,使得彼此之间能交换信息。由于聚合物波导的自身优势,基于聚合物波导的芯片光互连已经成为近年来研究的热门课题。传统印制电路板(PCB)受到电性连接物理特性的限制,其传输速度几乎已达极限,因此光电印制电路板(OEPCB)成为了具有成长潜力的 PCB 产品之一。

Matsuoka 等^[22]将多模聚合物光波导与聚合物微反射镜等集成在一起,制备了光传输速率高达 25 Gb/s 的 OEPCB,其结构如图 12 所示,其中 LD 为激光二极管,PD 为光探测器,LSI 为大规模集成电路。吴金华等^[23]使用多模聚合物波导开发了用于高速通信的光电印制电路板,如图 13 所示,其传输损耗约为 0.03 dB/cm,传输速度达到 10 Gb/s,波导之间的串扰小于 30 dB。

4.2 波分复用系统及阵列波导光栅

波分复用(WDM)技术指在输入端将以不同波长传输的加载各种信息的光载波合并起来,送入一根光纤进行传输,在接收端由波分解复用器(分波器)将这些不同波长的光载波分开。WDM 器件是 WDM 系统

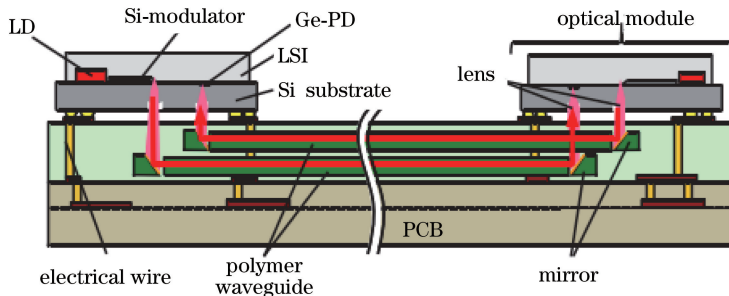


图 12 双层 OEPCB 中高速光信号传输的结构示意图^[22]

Fig. 12 Structural diagram of high-speed optical signal transmission in double-layer OEPCB^[22]

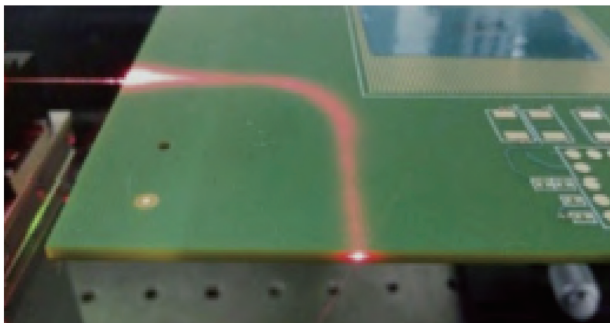


图 13 红光测试下的光电印制线路板^[23]

Fig. 13 OEPCB under red light test^[23]

的重要组成部分,目前商用化程度较高的波分复用/解复用器有三种:薄膜滤波器(TFF)、光纤光栅(FBG)和阵列波导光栅(AWG)。其中,AWG 是平面波导集成器件,是第一个将平面光波导回路(PLC)技术商品化的器件。AWG 易于实现小通道间隔和大通道数,被认为是未来实现密集 WDM 最有发展潜力的复用/解复用器之一。Jia 等^[24]提出了一种新型的空气槽结构来代替传统 AWG 的阵列波导结构,其结构示意图和扫描电镜(SEM)图如图 14 所示,器件尺寸大大减小。Chen 等^[25]选用 PMMA 作为衬底,以光刻胶 SU-8 为芯层,以苯并环丁烯 3022-35 为包层,制备了一种新型的全聚合物 49 信道 AWG 芯片,芯片的中心波长为 1550.918 nm,信道间隔为 0.8 nm,具有良好的绝热低偏振相关特性。

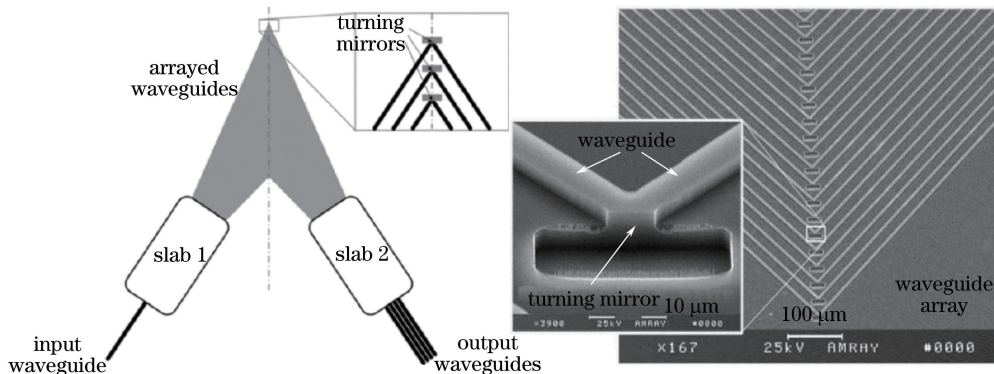


图 14 集成转向镜的 AWG 复用器的结构示意图和 SEM 照片^[24]

Fig. 14 Structural diagram and SEM photo of turning-mirror-integrated AWG multiplexer^[24]

4.3 波导光开关与光开关阵列

光开关与光开关阵列是实现全光网络的关键器件,在 WDM 光网络中发挥重要的作用,包括开关保护、开关阵列、光交叉互联、光分插复用、光域优化以及路由、自愈等功能,是光交叉连接器(OXC)和插分复用器(OADM)的核心技术之一。

4.3.1 热光开关

热光开关是利用热光效应,当波导一臂的温度变化时,其有效折射率发生变化,从而该臂光束的相位发生变化,通过两臂光束耦合并发生干涉,将相位变化转变成光强度的变化,从而实现光开关功能,如图 15 所示。

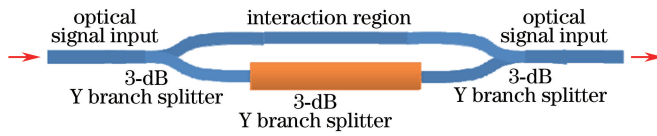


图 15 热光开关的结构示意图

Fig. 15 Structure diagram of thermo-optic switch

Cao 等^[26]合成了一种氧化石墨烯-聚酰亚胺(GOPI),如图 16 所示,并以此为光波导材料分别制备了 Y 分支型和马赫-曾德尔(M-Z)型热光开关。测试结果表明,两种热光开关的功率消耗分别为 0.93 mW 和 2.31 mW,开关响应时间分别为 1.8 ms 和 0.4 ms。

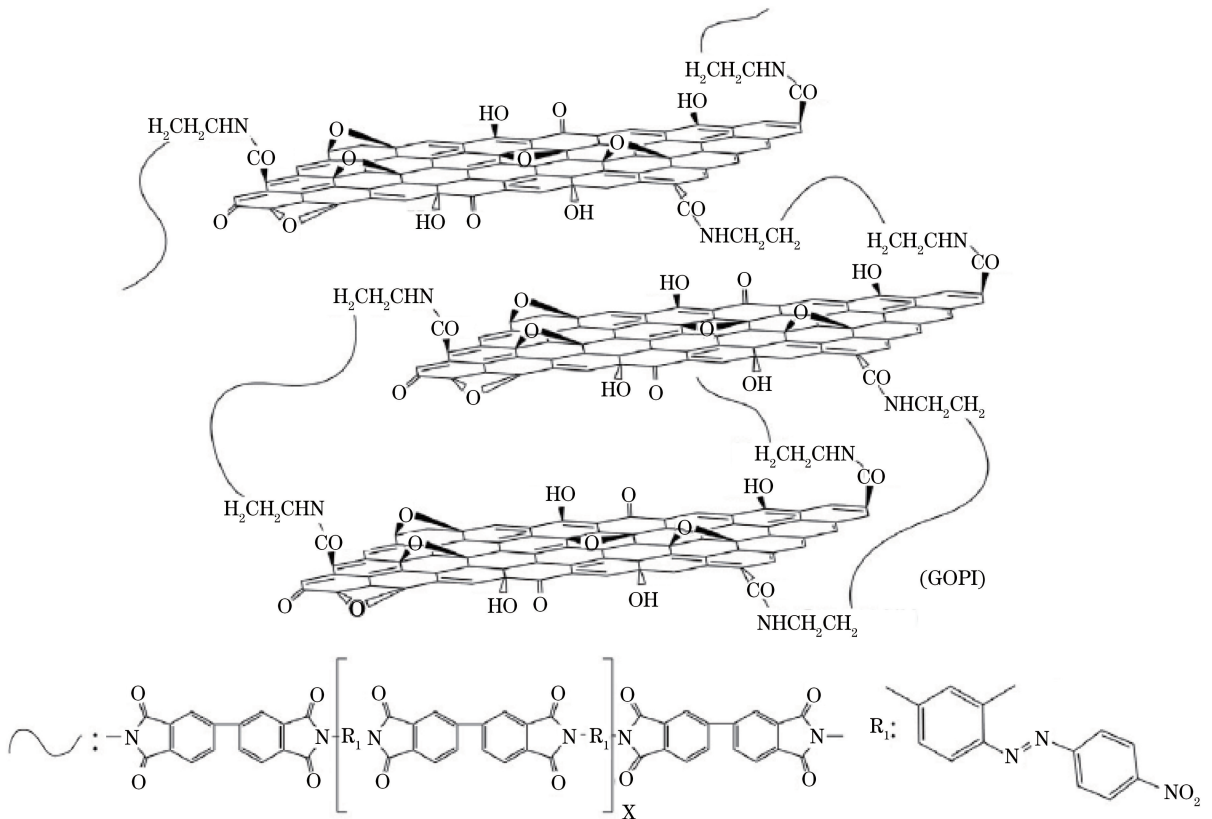


图 16 GOPI 的结构式^[26]

Fig. 16 Structural formula of GOPI^[26]

4.3.2 电光开关

电光开关利用电光效应原理改变波导材料的折射率,从而实现光的开关作用,如图 17 所示。目前,电光开关的开关时间可以达到亚微秒甚至纳秒量级。除了开关速度快,电光开关还有很多优点,如体积小、集成方便,因此成为了当今光纤通讯系统中必不可少的高速电光器件。

Wang 等^[27]通过掺杂分散红 19(DR19)染料与光刻胶 SU-8 的方式(如图 18 所示)制备了一种被动变主动式的集成波导电光开关(如图 19 所示,其中 MSL 为微带线),该电光开关在 1.55 μm 波长处的总插入损耗为 7.7 dB,开关响应时间达到了 26.29 ns(上升)和 24.53 ns(下降)。

4.3.3 聚合物波导光开关阵列

虽然目前国内外学者已经研制出多种有机聚合物干涉型和数字型光开关单元,但对于大规模集成化聚合物光开关阵列的研究鲜有报道。胡国华等^[28]研制出紧凑型树状分支结构 M-Z 型有机聚合物 1 \times 2 热光开

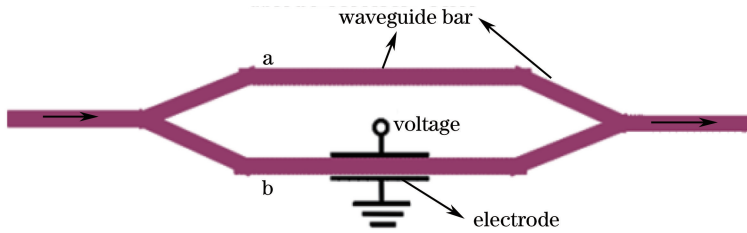
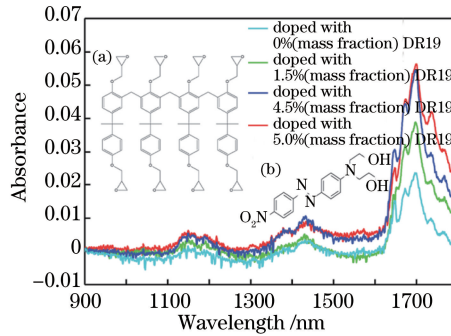
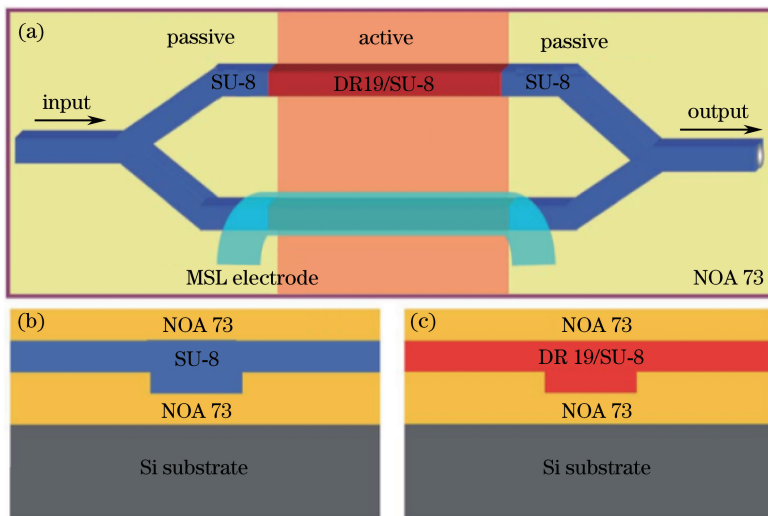


图 17 M-Z 型电光开关的结构示意图

Fig. 17 Structural diagram of M-Z electro-optic switch

图 18 (a) SU-8 和 (b) DR19 的分子结构和吸收光谱^[27]Fig. 18 Molecular structure and absorption spectra of (a) SU-8 and (b) DR19^[27]图 19 被动变主动式光波导电光开关的结构示意图^[27]Fig. 19 Structural diagram of passive-to-active optical waveguide electro-optic switch^[27]

关以及 1×32 集成波导热光开关阵列,如图 20 所示,其中 MMI 为多模干涉耦合器。

4.4 光放大器

不同于传统的光电光放大器,光放大器能够直接放大光信号,不需要进行光电信号转换,因此能更有效地放大信号光。与用于长距离光通信系统的光纤放大器相比,光波导放大器具有体积小、结构紧凑、集成简易、制作成本低等优点,对促进短距离光通信系统的发展起着重要的作用。

聚合物光波导放大器中的增益介质一般为稀土配合物或者氟化物纳米晶掺杂的聚合物。可选的基质材料较多,一般选择在放大波段吸收损耗低的聚合物材料,以增加光波导放大器的增益。Tsang 等^[29]使用掺杂 $\text{Eu}(\text{TTF})_3$ 的光刻胶 SU-8 来制作聚合物光波导放大器,当使用功率为 180 mW、波长为 350 nm 的抽运光时,器件在 612 nm 处获得的最大相对增益为 8.6 dB/cm。Yin 等^[30]以 SiO_2 为下包层,以 $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 纳米晶掺杂的 SU-8 聚合物为芯层,以聚 MMA-甲基丙烯酸缩水甘油酯,即 P(MMA-GMA)为上包层制

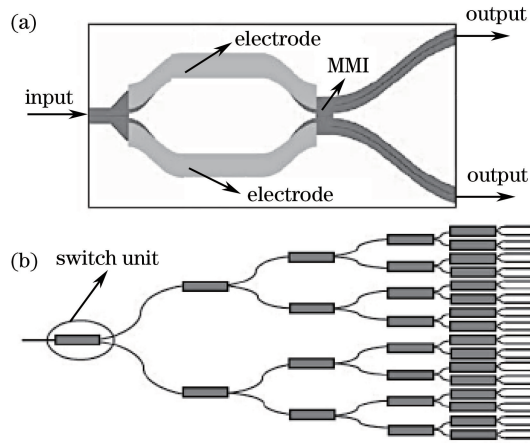


图 20 聚合物 1×32 光波导热光开关阵列^[28]。(a) M-Z 型 1×2 光开关单元；(b) 紧凑型树状分支结构

Fig. 20 Polymer 1×32 optical waveguide thermo-optical switch array^[28].

(a) M-Z type 1×2 optical switch unit; (b) compact tree-branching cascade structure

备了掺铈聚合物光波导放大器。当抽运光波长为 980 nm、功率为 170 mW、信号光功率为 0.1 mW 时，器件在 $1.55 \mu\text{m}$ 处获得的最大相对增益为 3.42 dB/cm。

4.5 微结构光纤器件

4.5.1 聚合物光纤传感器

Ren 等^[31]以 PMMA 为光纤材料，制备了一种双芯光子晶体光纤生物传感器，如图 21 所示。除了左侧纤芯小孔径 $d_c = 0.8 \mu\text{m}$ 外，其他孔径 d 、 d_a 均为 $1.3 \mu\text{m}$ ，孔间距 Λ 为 $2.8 \mu\text{m}$ ；右侧纤芯蓝色孔中充满生物抗体水溶液，而孔内壁粘合厚度为 t_s 、折射率为 n_s 的抗原物质；随着抗原对抗体（折射率为 n_a ）的粘合，其孔内壁的厚度（ $t_s + t_a$ ）也会增加，进而影响两个纤芯之间的耦合特征。图 22 给出了 t_s 分别为 40 nm 和 10 nm 时，薄膜厚度每变化 1 nm 时光谱仪得到的传输损耗随波长的变化曲线。

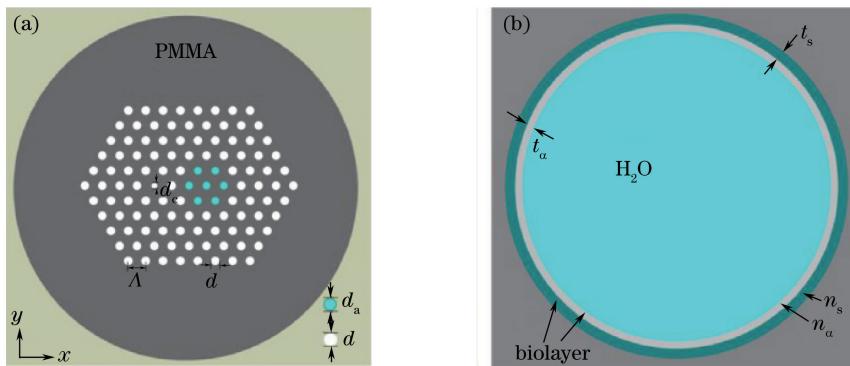


图 21 (a) 双芯 MPOF 生物传感器的横截面；(b) 包含传感层和生物分子吸附层的充满水的孔^[31]

Fig. 21 (a) Cross-section of dual-core MPOF biosensor; (b) water-filled hole including sensor

layer and attached layer of biomolecules^[31]

4.5.2 聚合物传像光纤

孔德鹏^[32]借助聚合物微结构光纤制作技术，研制出总直径为 0.25 mm、单丝直径为 $3 \mu\text{m}$ 的超高分辨率传像光纤，可分辨 $10 \mu\text{m}$ 的微刻度，如图 23 所示；还拉伸制作了 7100 pixel、外径为 2 mm、单丝直径为 $20 \mu\text{m}$ 的长距离整体式聚合物传像光纤，用于光纤监控系统，如图 24 所示。

4.5.3 太赫兹聚合物波导器件

近几年，随着太赫兹 (THz) 波应用技术的发展，THz 波的传输成为 THz 波通信中的一个重要研究方向。姬江军^[33]基于抗共振反射原理设计制作了一种具有微结构包层、基于德国 Topas 公司环烯烃共聚物 (COC) 材料的空芯型 THz 波导光纤，如图 25 所示。该光纤样品在 1.27 THz 处的平均传输损耗约为 2.175 dB/m。

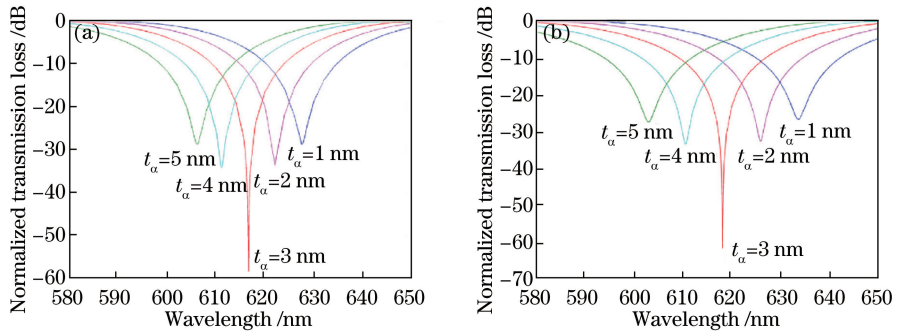


图 22 t_s 为(a) 40 nm 和(b) 10 nm 时,双芯层 MPOF 生物传感器的归一化传输损耗随波长的变化^[31]

Fig. 22 Normalized transmission loss of dual-core MPOF biosensor versus wavelength when t_s is (a) 40 nm and (b) 10 nm^[31]

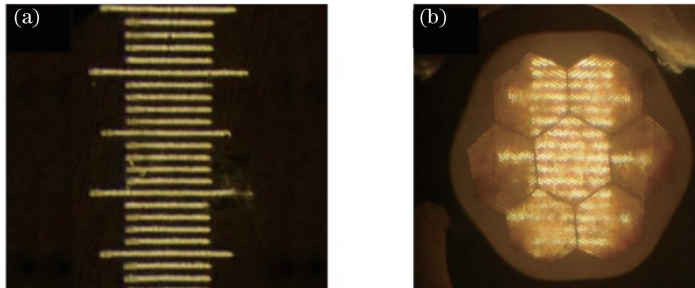


图 23 图像传输(a)前、(b)后的微刻度照片^[32]

Fig. 23 Photographs of miniature scale (a) before and (b) after image transmission^[32]



图 24 (a) 聚合物传像光纤;(b) 监视系统样机^[32]

Fig. 24 (a) Polymer image-transmitting optical fiber; (b) monitoring system prototype^[32]

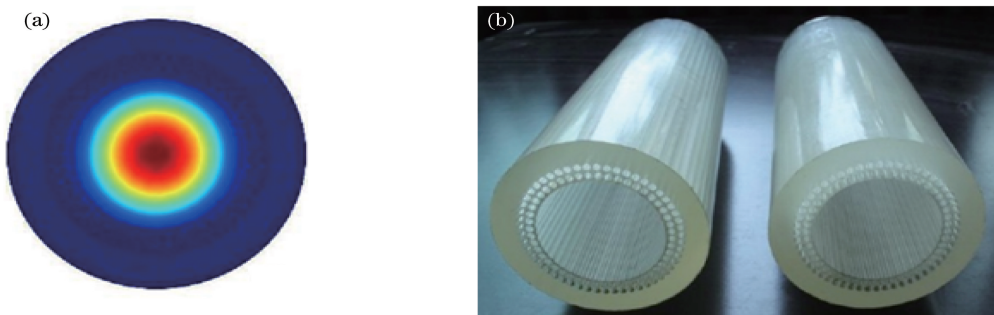


图 25 太赫兹光纤的截面结构^[33]。(a) 基模的能量分布;(b) 光纤预制棒照片

Fig. 25 Sectional structure of THz fiber^[33]. (a) Energy distribution of fundamental mode; (b) photo of optical fiber preform rod

5 结束语

信息时代的通信业务量呈爆炸式增长,为了满足不同的需求,可以通过光光集成、光电集成等方式,充分利用光波导器件高速的传输能力以及电子元器件成熟的技术及工艺,研究制造出性能优良、功能强大的通信元器件。

由于聚合物光波导具有电光耦合系数高、电学和机械性能好、加工集成方便等优点,目前国内外许多高校和研究机构都在积极开发聚合物光波导器件,并取得了重要进展。尽管如此,研究人员仍需面对来自光学聚合物新材料的设计合成、光波导器件的微纳加工和光学器件的大规模集成等方面的技术挑战。今后的研究方向主要集中在:1)进一步降低聚合物材料的光损耗,提高其热稳定性和光学性能;2)进一步提高光波导器件的加工精度和尺寸稳定性,减小光集成器件的极限尺寸;3)进一步提高光波导器件的性能,开发新型的光波导器件,拓展新的应用领域。

参 考 文 献

- [1] Yoshimura R, Hikita M, Tomaru S, *et al.* Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylate[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(6): 1030-1037.
- [2] Maruno T, Matsuura T, Ando S, *et al.* Single-mode optical waveguide fabricated using fluorinated polyimides[J]. *Nonlinear Optics*, 1996, 15(1-4): 485-488.
- [3] Wang L D, Zhang T, Li R Z, *et al.* Synthesis and characterization of cross-linkable fluorinated polyimide for optical waveguide[J]. *Applied Physics A*, 2015, 118(2): 655-664.
- [4] Lee H J, Lee E M, Lee M H, *et al.* Crosslinkable fluorinated poly (arylene ethers) bearing phenyl ethynyl moiety for low-loss polymer optical waveguide devices [J]. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 1998, 36(16): 2881-2887.
- [5] Qi Y H, Ding J F, Day M, *et al.* Cross-linkable highly fluorinated poly (arylene ether ketones/sulfones) for optical wave guiding applications[J]. *Chemistry of Materials*, 2005, 17(3): 676-682.
- [6] Zhang Junzhi. Synthesis of liquid PSQ used as optical waveguide materials by non-hydrolytic sol-gel technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
张军志. 非水解溶胶-凝胶法制备液态 PSQ 光波导材料[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [7] Tung K K, Wong W H, Pun E Y B. Polymeric optical waveguides using direct ultraviolet photolithography process[J]. *Applied Physics A*, 2005, 80(3): 621-626.
- [8] Zhao X L, Yue Y B, Liu T, *et al.* Optimized design and fabrication of nanosecond response electro optic switch based on ultraviolet-curable polymers[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(4): 184-192.
- [9] Cabanetos C, Mahé H, Blart E, *et al.* Preparation of a new electro-optic polymer cross-linkable via copper-free thermal Huisgen cyclo-addition and fabrication of optical waveguides by reactive ion etching [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 3(6): 2092-2098.
- [10] Singhal A R, Satyanarayan M N, Pal S. Fabrication of monomode channel waveguides in photosensitive polymer on optical adhesive[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(9): 094601.
- [11] Kruse K, Peng J, Middlebrook C T. Laser direct writing of complex radially varying single-mode polymer waveguide structures[J]. *Journal of Micro/ Nanolithography Mems & Moems*, 2015, 14(3): 034502.
- [12] Dong Mingming, Lin Geng, Zhao Quanzhong. Progress on femtosecond laser-fabricated waveguide devices in transparent dielectrics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010002.
董明明, 林 耿, 赵全忠. 飞秒激光在透明介质中制备波导器件进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010002.
- [13] Patzold W M, Reinhardt C, Demircan A, *et al.* Cascaded-focus laser writing of low-loss waveguides in polymers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1269-1272.
- [14] Zhou Bin. Femtosecond laser multi-photon micromachining[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
周 彬. 飞秒激光多光子微加工技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [15] Amirsolaimani B, Herrera O D, Himmelhuber R, *et al.* Electro-optic polymer channel waveguide fabrication using multiphoton direct laser writing[C]. *IEEE Optical Interconnects Conference*, 2015: 104-105.

- [16] Sun H S, Chen A T, Olbricht B C, *et al.* Polarization selective electro-optic polymer waveguide devices by direct electron beam writing[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8472-8479.
- [17] Jiang G M, Baig S, Wang M R. Flexible polymer waveguides with integrated mirrors fabricated by soft lithography for optical interconnection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(11): 1835-1841.
- [18] Large M, Poladian L, Barton G, *et al.* Microstructured polymer optical fibres[M]. US: Springer, 2008: 83-110.
- [19] Barton G, van Eijkelenborg M A, Henry G, *et al.* Fabrication of microstructured polymer optical fibres[J]. *Optical Fiber Technology*, 2004, 10(4): 325-335.
- [20] Wang J, Wang L. Carbon dioxide gas sensor derived from a 547-hole microstructured polymer optical fiber perform[J]. *Optics Letters*, 2010, 16(35): 3270-3272.
- [21] Zhang Y N, Li K, Wang L L, *et al.* Casting preforms for microstructured polymer optical fibre fabrication[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5541-5547.
- [22] Matsuoka Y, Adachi K, Lee Y, *et al.* A 25-G bit/s high-speed optical-electrical printed circuit board for chip-to-chip optical interconnections[C]. *IEEE CPMT Symposium Japan*, 2012: 1-4.
- [23] Wu Jinhua, Marika Immonen, Yan Huijuan, *et al.* Application of multimode polymer waveguide in optical-electrical printed circuit board[J]. *Electronics Process Technology*, 2015, 36(5): 291-294.
吴金华, Marika Immonen, 严惠娟, 等. 多模聚合物波导在光电印制板中的应用[J]. *电子工艺技术*, 2015, 36(5): 291-294.
- [24] Jia K, Wang W, Tang Y, *et al.* Silicon-on-insulator-based optical demultiplexer employing turning-mirror-integrated arrayed-waveguide grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(2): 378-380.
- [25] Chen C M, Wang H, Wang L, *et al.* Athermal polarization-independent 49-channel UV curable all-polymer arrayed waveguide grating (AWG) multiplexer[J]. *Optik*, 2015, 125(1): 521-525.
- [26] Cao T L, Zhao F Y, Da Z L, *et al.* A novel graphene oxide-polyimide as optical waveguide material: Synthesis and thermo-optic switch properties[J]. *Optical Materials*, 2016, 60: 45-49.
- [27] Wang X B, Jiang M H, Sun S Q, *et al.* Demonstration of a high-speed electro-optic switch with passive-to-active integrated waveguide based on SU-8 material[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(55): 50166-50172.
- [28] Hu Guohua, Yun Bin Feng, Cui Yiping. Polymer 1×32 waveguide thermo-optical switch array[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(10): 1873-1877.
胡国华, 恽斌峰, 崔一平. 有机聚合物 1×32 波导热光开关阵列[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(10): 1873-1877.
- [29] Tsang K C, Wong C Y, Pun E Y B. Eu^{3+} -doped planar optical polymer waveguide amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(14): 1024-1026.
- [30] Yin Jiao, Qu Chunyang, Zhang Meiling, *et al.* Gain characteristics of polymer waveguide amplifiers based on Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped nanocrystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1216001.
尹 姣, 曲春阳, 张美玲, 等. 基于铒镱共掺纳米晶的聚合物光波导放大器的增益特性[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1216001.
- [31] Ren N F, Sun B, Chen M Y. Label-free optical biosensor based on a dual-core microstructured polymer optical fiber[J]. *Optik*, 2015, 126(21): 2930-2933.
- [32] Kong Depeng. Design, fabrication and applications of microstructured optical elements and devices[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
孔德鹏. 微结构光学元件的设计、制作与应用关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
- [33] Ji Jiangjun. Preliminary study of the key components in terahertz waveguide system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
姬江军. 太赫兹波导系统中关键器件的初步研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.