光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022031003

聚合物平面光波导器件的研究进展

吕昕雨，尹悦鑫，李　悦，张大明*

（吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室，长春 130012）

摘　要： 聚合物平面光波导(PLC)器件以其低损耗、低成本、低功耗，以及制备工艺简单等优点，在光通信网络、微波光子学、传感监控等领域发挥着重要作用。文章梳理了近年来聚合物平面光波导器件的代表性工作，其中包括阵列波导光栅、可变光衰减器、光开关及其集成器件，讨论了聚合物平面光波导未来的发展方向。

关键词： 聚合物；波导器件；集成光学；阵列波导光栅；光开关

中图分类号： TN252　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0316－10

Recent Progresses about Polymer-based Planar Lightwave Circuit Devices

LV Xinyu，YIN Yuexin，LI Yue，ZHANG Daming

（State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics，College of Electronic Science and Engineering，Jilin University，Changchun 130022，CHN）

Abstract： Due to the merits of low loss，low cost，low power consumption and easy fabrication，polymer-based planar lightwave circuit (PLC) devices play important roles in optical communication networks，microwave photonics and optical sensor system. In this paper，the recent progresses of polymer-based PLC devices are reviewed，including array waveguide gratings，variable optical attenuators，optical switches，and their integrated devices. Finally，the future development trends of the polymer-based PLC is discussed.

Key words： polymer；planar lightwave circuit；integrated optics；array waveguide grating；optical switches

0　引言

近年来，集成光子学得到了广泛的研究与快速发展，特别是在光互连网络[1-9]、微波光子[10-12]、光学传感监控[13-18]等领域发挥着重要的作用。以光为媒介，进行信息传递与处理，是实现低延时、低功耗、高容量的解决方案，并在高性能计算和数据中心中得到了广泛研究与应用。在微波光子学中，光调制器与探测器用以实现更大的带宽与更高的速度；在传感领域，光学传感不仅可以实现更高的分辨率与灵敏度，而且能够实现多种参数的同时传感，甚至在可穿戴设备上灵活应用。

目前，用于制备集成光子器件的材料平台包括二氧化硅平面光波导平台[19-20]、绝缘体上硅集成光路平台[21-23]、磷铟基平面光波导平台[24-25]和聚合物平面光波导平台[26-29]。其中，采用聚合物材料制备光波导器件具有制造工艺简单、成本低、集成度高、性能优良的特点，从而得到了广泛的关注与研究。用于制备聚合物光子器件的材料成本低廉，产量大，可以降低器件本身的成本。由于其自身具有较高的热光系数，非常适于制备基于热光效应的光子器件，包括可变光衰减器[30-34]、光开关[35-37]、可调谐滤波器[38-42]等。之外，在合成材料的过程中，在分子层面还可以控制材料的组成成分与连接方法，实现低损耗、折射率可调和多功能复合的光子材料，制备包括高速电光聚合物开关[43-45]、电光聚合物调制器[46-50]、聚合物波导光放大器[51-57]等多种功能集成

收稿日期：2022－03－10.

基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFB2203001).

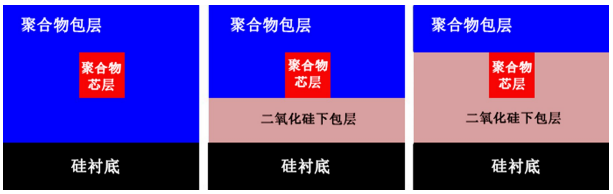
* 通信作者：张大明　E-mail：zhangdm@jlu.edu.cn

器件。

从器件制备的角度出发，聚合物光子器件只需要通过旋涂、紫外光刻的方式，在室温条件下，即可实现器件的制备，制备工艺简单，有利于进一步降低了器件的制作成本。近年来，为了进一步提高聚合物器件性能，减小器件尺寸，通过纳米压印[9,38]、激光直写[58-59]的方法制备器件均有报道，这些制备工艺均与互补金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor，CMOS）工艺兼容，易于实现大规模量产，使得聚合物光子器件的产业化潜力巨大。总地来说，聚合物平面光波导器件具有制备工艺简单、成本低的特点，同时低损耗、低功耗等优点使其易于大规模集成。本综述将围绕聚合物平面光波导器件展开论述，详细介绍其工作原理和具体应用。

1　聚合物平面光波导的主要结构

目前，聚合物波导主要包括如图 1 所示的三种结构。全聚合物波导即在硅衬底上，首先旋涂一层聚合物下包层，再旋涂一层聚合物芯层材料，通过紫外光刻等工艺手段，使波导图形化，最后通过旋涂制备聚合物上包层，其截面示意图如图 1(a)所示。这种波导制备工艺简单，且可以实现柔性器件的制备[60-65]；聚合物/二氧化硅混合波导截面示意图如图 1(b)所示，是在全聚合物波导基础上将全聚合物波导的下包层变成了二氧化硅包层，与聚合物相比，二氧化硅的热导率更大，这使得制备的器件具有更高的响应速度[33,66-68]。图 1(c)所示为聚合物/二氧化硅凹槽波导截面示意图，首先通过干法刻蚀的方式，在二氧化硅下包层中刻蚀出凹槽，再通过旋涂的方式填充凹槽，由于二氧化硅和聚合物之间并不互溶，因此制备的器件精度更高，侧壁更陡直，因此可降低器件的损耗，提高器件的性能[41,53,69-70]。



(a)　(b)　(c)

图 1　三种聚合物波导结构的截面示意图。(a)全聚合物波导；(b)聚合物/二氧化硅混合波导；(c)聚合物/二氧化硅凹槽波导

聚合物材料对光透明，基于聚合物波导的无源器件得到了广泛研究[66,71-74]。如图 2 所示，以二氧化硅为下包层，双酚 A 酚醛树脂（Bis-Phenol-A Novolac Resin，SU-8）为芯层，空气为包层的波导，由于 SU-8 和空气之间的大折射率差，可以得到紧凑的波导（宽 2 μm、厚 1.7 μm）。从图 2 中的插图可以看到圆润的近场光斑。基于该波导，所制备的 S 弯波导如图 3 所示，为了使弯曲波导的模式更加匹配，进一步降低由于弯曲而造成的损耗，S 弯波导在连接处的水平方向，设置了一个偏移量，来降低弯曲波导的损耗。如图 3(a)所示，分别设置了不同位移距离的 S 弯波导，并且扫描了偏移量。图 3(b)为横向位移量为 0.05 μm，半径为 25 μm 的 S 弯波导 SEM 图。在光波长 1 310 nm 处的损耗由于 SU-8 吸收低，损耗也会更低。基于上述空气包层聚合物波导结构，又设计并制得了 48 信道的 100 GHz 的阵列波导光栅（Array Waveguide Grating，AWG），器件的整体 SEM 图如图 4(a)所示[74]。图 4(b)和 4(c)分别为阵列波导区、输出波导区的放大 SEM 图。该器件的弯曲半径仅为 150 μm，测得的光谱如图 5 所示[74]，最低损耗为 3.7 dB，信道间串扰低于 −15 dB。信道间的非均匀性约为 4.5 dB。该器件可以用于光学传感、光谱仪和波分复用器当中。

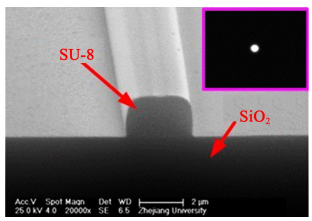
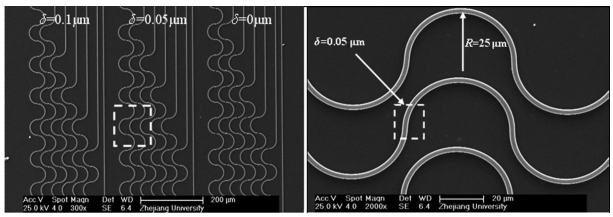
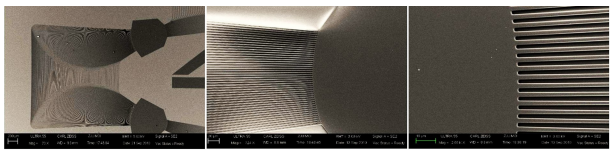


图 2　空气包层的 SU-8 波导端面 SEM 图（插图为该波导的近场光斑）[72]



(a)　不同位移距离的 S 弯波导　(b)　位移距离为 0.05 μm 的 S 弯波导[72]

图 3　空气包层的 SU-8 波导的 SEM 图



(a)　(b)　(c)

图 4　48 信道 100 GHz AWG SEM 图。(a)整体 SEM 图；(b)波导区放大 SEM 图；(c)输出波导区放大 SEM 图

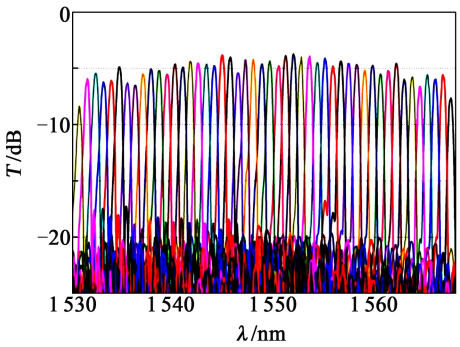


图 5 48 信道的 100 GHz AWG 测试光谱图

2 聚合物平面光波导器件

为了满足急剧增长的数据容量需求，人们将光器件应用在数据中心等领域，极大地拓宽了网络带宽，并降低了以往由电路产生的功耗[75-78]，通过波分复用、空分复用、时分复用等方法[79-86]，进一步提高了通信容量。为了灵活地运用这些技术，将有源光子器件，包括可变光衰减器、光开关、可调谐光滤波器等，引入网络，构建可重构光网络系统。为实现大规模集成，这些网络对器件的功耗提出了更高的要求。聚合物材料具有极宽的透明光谱，特别是可见光波导；除此之外聚合物光子器件由于其材料具有约 10^{-4} 量级的热光系数，可以实现低功耗的有源光子器件的制备，易于实现大规模光子器件的集成。以普通的聚合物材料为基础，合成的电光聚合物材料可以实现高速电光光子器件的制备。

2.1 聚合物平面光波导热光器件

聚合物光波导器件的发展可以从材料与结构两方面进行探究。Young-Tak Han 等[87]通过对一种 10 通道的聚合物热光数字光开关阵列（Digital Optical Switch，DOS）的研究，围绕降低串扰与功耗的目标，特别地在石英衬底上制作可以散射杂散光的光栅，使得抗串扰性能大大改善，最终在 50 mW 的功耗下，测得串扰值低至 −45 dB，每个通道的插入损耗都小于 1.35 dB。图 6 所示为所提出的 DOS 开关的单元结构示意图，每个基本单元由一个传统的 1×2 分支和辐射型衰减器在 Y 分支臂末端连接构成，用于加热的电极附着在包层上方，为了使光更好地偏转到自由空间，加热电极稍微偏离臂波导的顶部中心；当其中一个 Y 分支波导被加热时，相应折射率就会发生改变，最终使光信号从不同端口输出，其端口分为端口 1、端口 2 和端口 3，用 P12 表示端口 1 到端口 2 的开关状态，用 P13 表示端口 1 到端口 3 的开关状态。

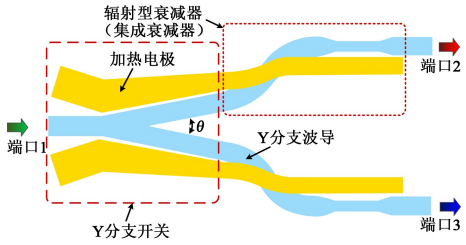


图 6 DOS 基本开关单元结构图[87]

该团队分别在有光栅结构的石英衬底上和无特殊结构的硅衬底上制备了光开关。光在传输过程中，会在聚合物下包层和硅衬底界面间强烈地反射，从而引入很大的串扰。当聚合物器件制备在有光栅结构的石英衬底上时，光栅结构有效减弱了杂散光，串扰得到了很好的抑制，如图 7 所示，测得开关在 1 530～1 560 nm 的串扰值低至 −45 dB，该器件可以应用在可重构光分差复用系统中。

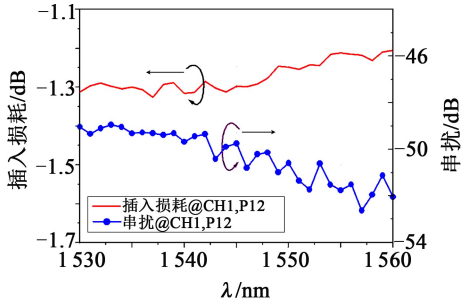
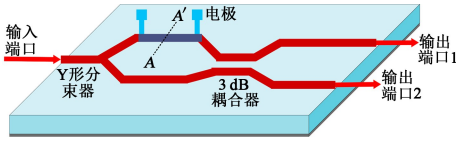


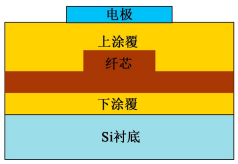
图 7 通道 1DOS 开关的插损与串扰光谱图[87]

通过对聚合物器件结构进行优化可以达到提升器件性能的目标，利用聚合物材料合成时的易控性制成折射率可调的专用材料同样也是提升器件品质的一种有效方法。聚合物材料在近红外波段表现出低损耗的透射窗口，在可见光波段也有着极低的光吸收。Wang 等[37]研究了 650 nm 波长下聚合物热光开关的制作。该团队利用聚合物材料合成时折射率可调的优势，以甲基丙烯酸甲酯（Methylmethacrylate，MMA）和甲基丙烯酸缩水甘油酯（Glycidyl Methacrylate，GMA）共聚合成了物理化学性质稳定的可交联聚合物 P(MMA-GMA)，通过控制调节双酚 A 环氧树脂占比，该材料在波长 1 550 nm 处的折射率可以很容易地控制在 1.48～1.55。使用上述合成材料制成的器件结构如图 8(a)所示，包括一个分光均匀的 Y 分支结构，在其中一臂上加入 10 mm 的相位调谐部分，在调制的后端集成了一个 3 dB 定向耦合器。通过在电极上施

加电压可以改变加热器温度，使相应波导结构感应到因温度变化导致折射率改变，从而在两输出波导之间切换输出，调制臂处的端面结构如图 8(b)所示。最终，随电压变化，两输出端口的输出功率不同。端口 1 输出光功率从最小值切换到最大值所需功率仅为 5.3 mW，消光比为 23.4 dB。



(a)　开关器件结构示意图



(b)　AA'处端面结构图[37]

图 8　开关器件结构和 AA'处端面结构示意图

SU-8 材料具有良好的稳定性、生物相容性以及优异的力学性质，但是 SU-8 材料中 C—H 键吸收部分波长的光从而产生损耗，而以 C—F 键取代 C—H 键的氟化聚合物可以大幅降低光吸收损耗，并且氟化光聚合物材料低表面能和吸湿性以及良好的稳定性可以使它在光学领域应用更加广泛。文献[30]选用氟化 SU-8 和氟化聚碳酸脂环氧树脂(Fluorinated Polycarbonate Epoxy Resin，FPER)合成聚合物材料，合成材料折射率可控。与普通商用 SU-8 相比，不同比例混合的氟化 SU-8/FPER 近红外吸收光谱不同，普通光刻胶在近红外区存在一定的吸收峰，而合成材料几乎没有吸收，这可以使器件损耗大幅度降低。该研究以此制作了马赫-曾德尔型(Mach-Zehnder Interferometer，MZI)光开关，测得在 1 550 nm 波长处，其 TE 模和 TM 模插入损耗之差小于 0.8 dB，偏振位移小于 0.1 nm，消光比约为 17.8 dB，开关电源功率为 9.2 mW，相应电极温升为 5 K。

对聚合物器件高效低耗的研究主要是为实现集成器件打基础。文献[63]研究了聚合物光子器件的集成模块，其结构如图 9 所示。可重构光分插复用器(Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer，ROADM)将阵列波导光栅、延时线、光开关阵列集成在了同一块芯片上，可以得到多功能集成芯片。在该芯片上包括 16 通道的 100 GHz 阵列波导光栅、8 通道 MZI 开关阵列和 8 通道延迟线阵列。制备过程包括在硅衬底上旋涂 10 μm 的聚合物杂化薄膜作为下包层，退火后旋涂 4 μm 氟化 SU-8 作为芯层，通过铬掩膜版进行接触式光刻，对器件图案曝光后显影、固化，以增强聚合物波导和包层间的附着力，为了降低金属引起的光吸收，旋涂了 10 μm 厚的有机-无机杂化薄层作为上包层，最后通过光刻和湿法刻蚀制作出铝电极。

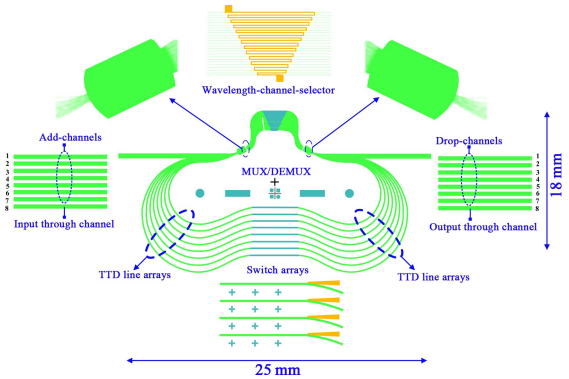
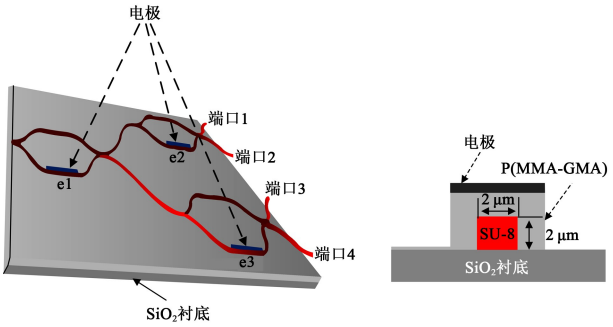


图 9　集成 ROADM 模块结构示意图[63]

通过改变施加在电极上的电压，该集成器件表现出波长通道选择性，当电压从 1.5 V 变化到 10.5 V 时，输入信号可以从第一通道调节至第八通道，电极的热驱动功率为每通道 6.5 mW。此集成器件在 TM 模式下的传输损耗约为 6 dB，串扰在 30 dB 以下，不同通道的热光开关最大调制深度相似，在 1.9 V 的偏压下约为 15.5 dB；单个开关的最大功耗小于 10 mW；阵列弯曲波导之间间距差恒定，可以提供 20～140 ps 的延迟时间。

有关聚合物热光开关损耗性能提升的研究也有所报道。2017 年 He 等[68]将定向耦合器与非对称 MZI 相结合，并在波导中引入空气槽，大大降低了开关功耗并提升了响应速度。所提出的 1×4 聚合物热光开关结构如图 10，两个二级 1×2 开关单元连接到一级开关单元上，在开关的一臂上加上电极引入相位差进行调制。器件选用聚合物作为芯层和包层，波导宽度和长度设计为 2 μm，以保证单模传输并消除偏振依赖性。混合波导结构由于有较高的热稳定性，不利于功耗的降低，所以特别设计了空气槽结构加强散热。在传统结构中，波导层的平均温度变化不如带空气槽波导平均温度变化明显，这会使热折射率调制效果减弱，要达到相同效果则需要更高的功耗。空气槽结构使热场很好地限制在导向层中，从而避免热量损失，因此驱动功率更低、电流密度更大、开关速度更快。最终经测试得到，该聚合

物光开关功率约为 6 mW，上升时间和下降时间分别为 160 和 80 μs，消光比达 20 dB。



（a） 1×4 开关示意图 （b） 波导横截面图[68]

图 10 1×4 开关示意图和波导横截面图

从对器件结构和聚合物热光材料性能的研究，结果表明聚合物热光开关很大程度上可以通过以上两个方面进行串扰与功耗的优化，其原因主要是聚合物器件制备方法简单，聚合物材料合成可控，这意味着多功能集成器件的研究领域会更加广阔。

2.2 聚合物平面光波导电光器件

现代电信工程的发展，对高速电光器件的需求日益增多，其中由聚合物光波导制成的电光调制器等是这些器件的重要组成部分。电光调制的一大吸引力是可以通过施加电压线性调制相位，使得信号速度、容量、准确性有着极高的品质保证。聚合物材料有着高电光系数、低介电常数和损耗，与其他材料基底可以广泛兼容，使得聚合物电光器件的驱动电压低、响应速度快，可以为数据中心、5G 通信、自动驾驶和航空系统等高能耗和恶劣环境应用提供快速可靠的互联，有效解决下一代光通信能耗问题。

聚合物电光器件的材料稳定性对器件性能至关重要，热稳定和光稳定是制备聚合物电光材料的两大重要方向。在数据通信系统中，冷却系统功耗占了很大一部分，解决冷却系统耗能问题的有效方案是提高工作温度，工作温度每升高 1 ℃，可节省 4% 的冷却成本，因此要求电光调制器在高温下仍能保持良好的工作性能和可靠性，这成为器件的下一步的研究方向。

Wang 等[43]通过改进聚合物材料性能，特别是涉及高电光系数和稳定性方面的性能，结合对 MZI 结构的优化，制作了以电光聚合物为包层的共面波导电极高速开关。以 MMA 和 GMA 为原料合成可交联聚合物 P(MMA-GMA)，交联中，客体材料生色团 DR1 作为主链的侧链共价连接到聚合物上。通过调节 DR1 和双酚 A 环氧树脂的重量配比，可以控制其折射率和电光系数。提高 DR1 比重有助于提高电光系数，但过量掺入 DR1 会导致聚集而增加损耗，最终得到优化浓度为 28wt%。

除了对材料的优化，该团队也对聚合物器件结构进行了改进。图 11 显示了一种 1×1 带有共面电极的 MZI 结构，包括一个对称的 Y 形分束器，其中一臂上加入 18 mm 的相位调谐部分，当加入调制电压到电极上时，会使有效折射率发生改变，进而改变波导中的光程长度。经测试，ON 状态下的最大输出功率约为－7.3 dBm，OFF 状态下的最小输出功率为－19.8 dBm，在 1 550 nm 波长下，器件的传输损耗为 1.02 dB。将 50 kHz 方波信号施加到电极上，测得其上升时间和下降时间分别为 19.00 和 30.89 ns。

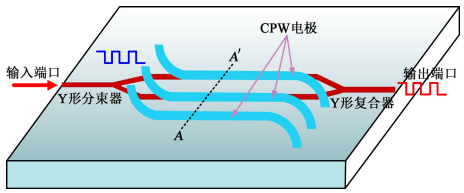
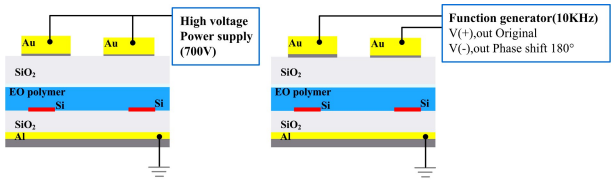


图 11 器件结构示意图[43]



（a） MZI 调制器极化示意图 （b） 差分电压法测量 V_π

图 12 MZI 调制器极化示意图和差分电压法测量 V_π

文献[88]提出了一种低驱动电压环戊大带宽的混合硅环氧乙烷聚合物调制器，在二氧化硅衬底上制作了宽度为 5 μm、厚度为 50 nm 的硅波导，然后旋涂电光聚合物，他们使用混合生色团的环氧乙烷聚合物结构，将聚合物 T_g 由 172 ℃提高到 192 ℃，耐热性良好。为实现调制器，需要使波导极化，如图 12(a)所示，在电极上施加直流电压，167～170 ℃温度下对波导进行极化，在 10 kHz 下测量模块的传递函数，最终可以观察到高达 40 GHz 的调制响应，3 dB 带宽为 23 GHz。为了测试该器件的稳定性[89]，将该器件放置在 105 ℃的环境中，经过约 2 000 h 的烘烤，仍然表现出稳定的性能。这进一步展示了聚合物电光器件的可靠性。

在硅基聚合物的基础上，Lu 等[48]研究了一种在极端环境下仍有良好工作性能的聚合物调制器。

他们制作的调制器在保持高速信号高保真度的同时，可以承受 110 ℃的高温环境。制备器件材料的电光系数（n_3r_{33}=1 021 pm·V^{-1}）可以实现 120 Gbit/s 的 OOK 信号，200 Gbit/s 的 PAM4 信号。将器件放置在 90 ℃环境下，约持续 100 h 后，其光电性能仍然可以保持。

有机聚合物有大电光系数、低介电常数和很低的损耗，使得其在调制器制造中占有很大优势，进来不断提高的聚合物材料稳定性也开辟了器件的可靠性。低驱动电压和高速稳定操作是开发更高比特率通信设备的一大目标，人们对聚合物材料合成和器件设计的研究将依旧是光学通信技术领域中的重要一环。

2.3　聚合物平面光波导传感器

由于聚合物材料具有灵敏度高、制备工艺简单和生物兼容的特点，以聚合物制备光子器件，实现环境传感的研究被广泛关注，在温度、折射率、细菌和病毒检测、医学诊断、药物化合物筛选、食品安全和环境检测等领域均有应用[14,28,64,90-96]。

常见用于波导传感的结构有 MZI 形、微环谐振器形、布拉格光栅和模态干涉结构等。其中 MZI 和微环形式是光通信和传感系统中最基本的元件。基于聚合物微环探针灵敏度高，且具有鲁棒性、易于试剂滴定、可以很好地与电子器件集成等优点，在生物和化学传感器领域一直备受关注。基于聚合物的 MZI 传感器可以用于温度、试剂浓度的探测，并且具有超高分辨率。典型的聚合物光波导器件传感器检测的基本原理是利用倏逝波检测传感器表面或周围介质的有效折射率变化，检测极低浓度的待测物通常需要很长时间来检测相移，且器件尺寸较大，运用光波导器件可以灵敏地捕捉相移并减小尺寸。

与传统电阻测温传感器相比，光学温度传感器具有灵敏度高、耐腐蚀和对电磁干扰及湿度不敏感的优点，NIU 等[92]提出并设计制作了一种基于非对称 MZI 干涉仪的超灵敏聚合物波导温度传感器，采用热光系数较大的聚合物制作而成，包层材料的热光系数影响着温度传感器的灵敏度 S，该研究还对包层材料和波导宽度差做了相关探究。制备的器件结构如图 13，有输入单模波导、输出单模波导、3 dB 分路器、3 dB 耦合器和两个具有不同波导宽度的干涉臂组成。两臂长度相等，L_0 和 L_s 为直波导长度，L_t 为锥形波导长度。W_1 和 W_2 分别是臂 1 和臂 2 的宽度，其中引入锥形波导是为了防止高阶模的产生。随着温度变化，由于波导宽度不同，两臂中引起的相移不同，输出光谱发生改变，从而可获得温度变化。通过对不同包层材料 EPO 和 NOA73 以及不同波导宽度的实验探究，最终得出结论为较大的波导宽度差和较大的热光系数可以提高温度传感器的灵敏度，该实验最终得到的最低温度分辨率可达 0.97×10^{-3} ℃。

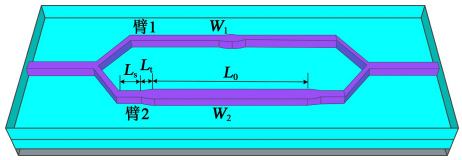
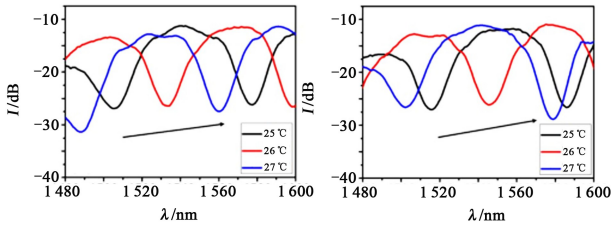
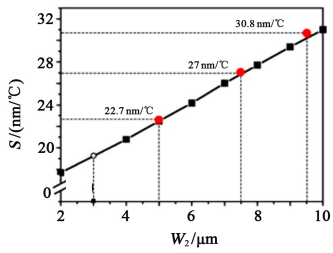


图 13　非对称 MZI 波导结构示意图[92]



（a）　臂 2 为 7.5 μm 时输出光谱　　（b）　臂 2 为 9.5 μm 时输出光谱



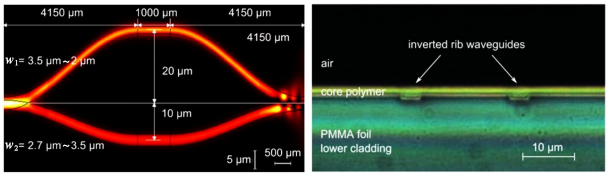
（c）　灵敏度与臂 2 宽度关系图[92]

图 14　臂 2 为 7.5 和 9.5 μm 时输出光谱图及灵敏度与臂 2 宽度关系图

传感器除了在温度领域的应用，更多会使用在测定分子浓度上，如 Meike 等[93]同样利用了两臂宽度不同的 MZI 结构进行传感器的制作，最终用于不同浓度的葡萄糖溶液的传感测定，其测量精度可达 3×10^{-3} RIU。浓度传感器的工作原理是将待测溶液作为器件的上包层，浓度不同时有效折射率也会发生相应改变，本例中配合不对称的两个干涉臂，可得到相应的干涉信号。通过综合考量 Y 分支波导的长度和弯曲波导的弯曲半径对损耗的影响，采用传统 UV 光刻技术并进行倒脊形波导制作，最终设计的器件形貌如图 15。对不同溶液以及不同操作点对的 MZI 测试结果如图 16。

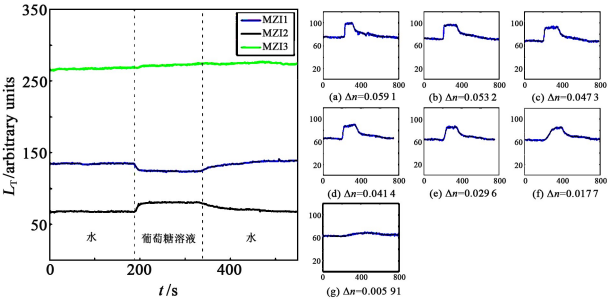
图 16(a)为不同 Y 分支长度的 MZI 测量值，图 16(b)显示了不同折射率差下，测量物质由去离子水改为葡萄糖溶液再改为去离子水的测量结果。计

算后可得测量精度在 0.003 0～0.005 6RIU。



(a) MZI 结构图 (b) 波导端面显微镜照片[93]

图 15 MZI 结构图和波导端面显微镜照片



(a) 不同 Y 分支长度 MZI 测量值 (b) 不同溶液中测量结果图[93]

图 16 不同 Y 分支长度 MZI 测量值和不同溶液中测量结果图

法国 Pauline Girault 等[94]用 SU-8 作为微环芯层材料，确保光波可以被有效限制在波导芯层中，以折射率相对较低的 PMATRIFE 聚合物为下包层制备了微环器件。该团队选择了单边耦合的微环谐振器结构，微环直径为 240 μm，保证单模传输，波导尺寸为 1.5 μm×1.5 μm，利用 UV 光刻技术成功实现了环形波导与直波导之间 0.5～1 μm 的间隙，其结构如图 17。用空气、水、不同浓度的葡萄糖溶液进行了测试。结果显示归一化程度高，Q 值为 1.5×10^4，耦合比为 14.7%，在 1 550 nm 处获得了(115±8) nm/RIU 的高性能器件。

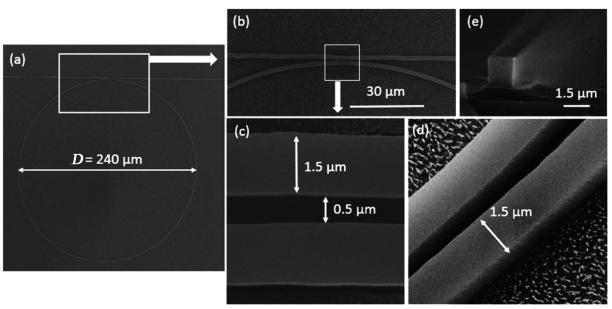
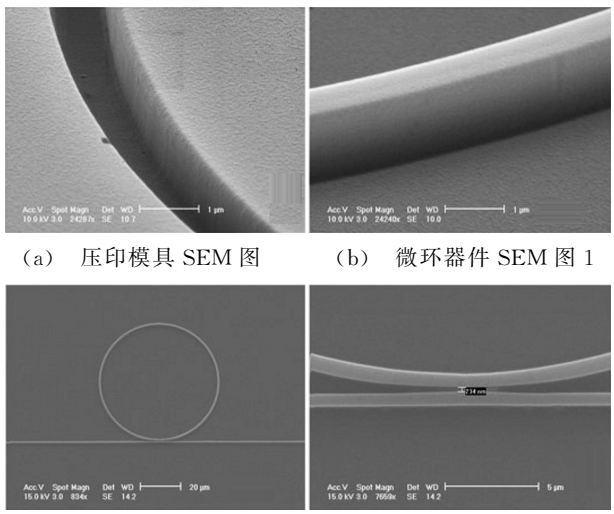


图 17 微环器件的 SEM 图[94]

同一时期，Tu 等[28]同样研究了 SU-8 聚合物微环谐振器，并获得了 Q 值高达 8×10^5 的器件。这一研究突破了历史记录，将 Q 值数量级大大提高。同时该团队采用压印技术制作器件，采用较低的烘烤温度，避免了微环大面积弯曲。图 18(a)展示了其透明压印模具，材料为环氧倍半硅氧烷(Smooth-Sidewall Epoxysilsesquioxane，SSQ)，模具从硅主模板复制而来，一旦透明模具弄脏或是损坏，可以从母版上制备新的模具。图 18(b)为微环波导侧壁的展示，可以看到波导光滑，性能良好。微环和直波导间隙为 234 nm。该实验设计了物理吸附的分子量为 12.7 pg/mm^2 牛血清蛋白分子(Bovine Serum Albumin，BSA)的表面质量检测。在波长偏移方案中，噪声等效检测限(Noise-Equivalent Detection Limit，NEDL)约为 5.3 pg/mm^2；强度检测中，NEDL 约为 55.9 fg/mm^2。证明了聚合物微环谐振器在生物传感器领域的优秀应用。



(a) 压印模具 SEM 图 (b) 微环器件 SEM 图 1

(c) 微环器件 SEM 图 2 (d) 微环器件 SEM 图 3

图 18 压印模具 SEM 图和微环器件 SEM 图[28]

利用倏逝场检测折射率变化是聚合物微环传感器的核心原理，这一特性可以用于生物医疗诊断、环境检测等各种传感监测设备中。近年来的研究主要围绕器件制造展开，利用聚合物特点，结合纳米压印、直接退火刻蚀等工艺，制造出的高精度、高分辨率的聚合物微环器件，在温度和浓度传感方面都有着出色的表现。

3 总结

本文综述了聚合物平面光波导的器件基本结构、制造方法及其应用的最新进展。利用低成本的聚合物材料，通过简单、快速、方便的制作工艺，可以获得低损耗、低功耗、高性能的聚合物集成光子器件。介绍了基于聚合物波导的阵列波导光栅、热光开关、电光调制器及其集成器件，热光开关的功耗在 10 mW 以内，电光调制器最快可以传递 200 Gbit/s

的数据。高稳定性的电光调制器可以在 105 ℃以上的高温下稳定工作 2 000 h 以上。除此之外，聚合物材料还表现出良好的生物兼容特性，使得该器件可以应用在温度、超声以及生物等传感领域。为了进一步减小器件尺寸，降低波导损耗，基于纳米压印技术的聚合物微环谐振器也得到了大量研究。同时，由于聚合物材料可以与多功能化学链聚合的性能，以及掺杂稀土元素实现放大功能，为聚合物材料以及聚合物器件功能拓展提供了可能。由于聚合物材料的制备工艺简单，更容易实现三维集成器件的制备，这也使得聚合物光波导的集成度大幅提升。总的来说，聚合物平面光波导器件正朝着高度集成、性能优异、高稳定的方向发展，将在数据中心、光通信网络以及片上实验室系统等领域发挥越来越重要的作用。

参考文献：

[1] Zhou Linjie, Djordjevic Stevan S, Proietti Roberto, et al. Design and evaluation of an arbitration-free passive optical crossbar for on-chip interconnection networks[J]. Appl. Phys. A, 2009, 95(4): 1111-1118.

[2] Takagi Yutaka, Suzuki Atsushi, Horio Toshikazu, et al. Low-loss chip-to-chip optical interconnection using multichip optoelectronic package with 40 Gb/s optical I/O for computer applications[J]. J. Lightwave Technol., 2010, 28(20): 2956-2963.

[3] Ryu J H, Kim P J, Cho C S, et al. Optical interconnection for a polymeric PLC device using simple positional alignment[J]. Opt. Express, 2011, 19(9): 8571-9.

[4] Nikolova D, Rumley S, Calhoun D, et al. Scaling silicon photonic switch fabrics for data center interconnection networks[J]. Opt. Express, 2015, 23(2): 1159-75.

[5] Itoh Kazuto, Kuno Yuki, Hayashi Yusuke, et al. Crystalline/amorphous Si integrated optical couplers for 2D/3D interconnection[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2016, 22(6): 255-263.

[6] Lu L, Zhao S, Zhou L, et al. 16×16 non-blocking silicon optical switch based on electro-optic Mach-Zehnder interferometers[J]. Opt. Express, 2016, 24(9): 9295-307.

[7] Qiao L, Tang W, Chu T. 32×32 silicon electro-optic switch with built-in monitors and balanced-status units[J]. Sci. Rep., 2017, 742306.

[8] Cheng Qixiang, Bahadori Meisam, Hung Yu-Han, et al. Scalable microring-based silicon clos switch fabric with switch-and-select stages[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2019, 25(5): 1-11.

[9] Khan M U, Justice J, Petaja J, et al. Multi-level single mode 2D polymer waveguide optical interconnects using nano-imprint lithography[J]. Opt. Express, 2015, 23(11): 14630-14639.

[10] Marpaung David, Roeloffzen Chris, Heideman René, et al. Integrated microwave photonics[J]. Laser Photon. Rev., 2013, 7(4): 506-538.

[11] Marpaung David, Yao Jianping, Capmany José. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photonics, 2019, 13(2): 80-90.

[12] Liu Yang, Choudhary Amol, Marpaung David, et al. Integrated microwave photonic filters[J]. Advances in Optics and Photonics, 2020, 12(2): 485-555.

[13] Zhang Cheng, Chen Sung-Liang, Ling Tao, et al. Imprinted polymer microrings as high-performance ultrasound detectors in photoacoustic imaging[J]. J. Lightwave Technol., 2015, 33(20): 4318-4328.

[14] Xu F, Li X, Shi Y, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review[J]. Micromachines (Basel), 2018, 9(11): 580.

[15] Wang Yuye, Zeng Shuwen, Humbert Georges, et al. Microfluidic whispering gallery mode optical sensors for biological applications[J]. Laser Photonics Rev., 2020, 14(12): 2000135.

[16] Milvich Johannes, Kohler Daria, Freude Wolfgang, et al. Integrated phase-sensitive photonic sensors: A system design tutorial[J]. Adv. in Optics and Photonics, 2021, 13(3): 584-642.

[17] Gong He, Cai Chuan, Gu Hongjun, et al. Flexible and wearable strain sensor based on electrospun carbon sponge/polydimethylsiloxane composite for human motion detection[J]. RSC Advances, 2021, 11(7): 4186-4193.

[18] Adamopoulos Christos, Buchbinder Sidney, Zarkos Panagiotis, et al. Fully integrated electronic-photonic biosensor for label-free real-time molecular sensing in advanced zero-change CMOS-SOI process[J]. IEEE Solid-State Circuits Lett., 2021, 4: 198-201.

[19] Takahashi Masanori, Yamasaki Shintaro, Uchida Yasuyoshi, et al. Compact and low-loss ZrO_2-SiO_2 PLC-based 8×8 multicast switch for CDC-ROADM application[J]. J. Lightwave Technol., 2016, 34(8): 1712-1716.

[20] Kang S K, Huh J Y, Song J, et al. Verification of hybrid-integrated 400-Gb/s (4×100 Gb/s) CWDM4 ROSA using a bandwidth-improved multilayer board[J]. Opt. Express, 2020, 28(22): 33094-33105.

[21] Zortman W A, Trotter D C, Watts M R. Silicon photonics manufacturing[J]. Opt. Express, 2010, 18(23): 23598-607.

[22] Lim Andy Eu-Jin, Junfeng Song, Qing Fang, et al. Review of silicon photonics foundry efforts[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2014, 20(4): 405-416.

[23] Thomson David, Zilkie Aaron, Bowers John E, et al. Roadmap on silicon photonics[J]. J. of Optics, 2016, 18

(7):.

[24] Augustin Luc M, Santos Rui, den Haan Erik, et al. InP-based generic foundry platform for photonic integrated circuits[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2018, 24(1): 1-10.

[25] Andriolli Nicola, Bontempi Francesca, Contestabile Giampiero. InP monolithically integrated transmitters based on high speed directly modulated DFB lasers[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2020, 26(5): 1-6.

[26] de Felipe David, Kleinert Moritz, Zawadzki Crispin, et al. Recent developments in polymer-based photonic components for disruptive capacity upgrade in data centers[J]. J. Lightwave Technol., 2017, 35(4): 683-689.

[27] Han Xiuyou, Wu Zhenlin, Yang Sicheng, et al. Recent progress of imprinted polymer photonic waveguide devices and applications[J]. Polymers, 2018, 10(6): 603.

[28] Tu Xin, Chen Sungliang, Song Chaolong, et al. Ultrahigh *Q* polymer microring resonators for biosensing applications[J]. IEEE Photon. J., 2019, 11(2): 1-10.

[29] Ullah Fateh, Deng Niping, Qiu Feng. Recent progress in electro-optic polymer for ultra-fast communication[J]. PhotoniX, 2021, 2(1): 1-18.

[30] Niu X, Zheng Y, Gu Y, et al. Thermo-optic waveguide gate switch arrays based on direct UV-written highly fluorinated low-loss photopolymer[J]. Appl. Opt., 2014, 53(29): 6698-705.

[31] Niu D, Sun S, Xu Q, et al. Optimized design and fabrication of polymer/silica thermo-optic switch with low power consumption[J]. Appl. Opt., 2017, 56(21): 5799-5803.

[32] Sun Shiqi, Niu Donghai, Sun Yue, et al. Design and fabrication of all-polymer thermo-optic variable optical attenuator with low power consumption[J]. Appl. Phys. A, 2017, 123(10): 1-6.

[33] Liu Y F, Wang X B, Sun J W, et al. Improved performance of thermal-optic switch using polymer/silica hybrid and air trench waveguide structures[J]. Opt. Lett., 2015, 40(9): 1888-1891.

[34] Xu Q, Jiang M, Niu D, et al. Fast and low-power thermo-optic switch based on organic-inorganic hybrid strip-loaded waveguides[J]. Opt. Lett., 2018, 43(20): 5102-5105.

[35] Han Y T, Shin J U, Park S H, et al. 2×2 polymer thermo-optic digital optical switch using total-internal-reflection in bend-free waveguides[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(19): 1757-1760.

[36] Wang X, Howley B, Chen M Y, et al. 4×4 nonblocking polymeric thermo-optic switch matrix using the total internal reflection effect[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2006, 12(5): 997-1000.

[37] Wang X B, Sun J, Liu Y F, et al. 650-nm 1×2 polymeric thermo-optic switch with low power consumption[J]. Opt. Express, 2014, 22(9): 11119-28.

[38] Han Xiuyou, Wang Linghua, Wang Yu, et al. UV-soft imprinted tunable polymer waveguide ring resonator for microwave photonic filtering[J]. J. Lightwave Technol., 2014, 32(20): 3924-3932.

[39] Liu Anjin, Zhang Ziyang, de Felipe David, et al. Power-efficient thermo-optic tunable filters based on polymeric waveguide Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26(3): 313-315.

[40] Zhang Z, Maese-Novo A, Schwartz E, et al. 301-nm wavelength tunable differentially driven all-polymer optical filter[J]. Opt. Lett., 2014, 39(17): 5170-2.

[41] Tian L, Wang F, Wu Y, et al. Polymer/silica hybrid integration add-drop filter based on grating-assisted contradirectional coupler[J]. Opt. Lett., 2018, 43(10): 2348-2351.

[42] Park T H, Kim S M, Oh M C. Polymeric tunable wavelength filter with two-stage cascaded tilted Bragg gratings[J]. Opt. Express, 2020, 28(7): 10145-10152.

[43] Wang Xibin, Sun Jingwen, Sun Jian, et al. Demonstration of a high-speed switch with coplanar waveguide electrodes based on electro-optic polymer-clad waveguides[J]. RSC Advances, 2015, 5(83): 67646-67651.

[44] Wang X, Zhang M, Jiang M, et al. Monolithic integrated waveguide device with dual functions of electro-optic modulation and optical amplification[J]. Opt. Lett., 2021, 46(15): 3536-3539.

[45] Hirano Yoshikuni, Miyamoto Yuji, Miura Masato, et al. High-speed optical-beam scanning by an optical phased array using electro-optic polymer waveguides[J]. IEEE Photonics J., 2020, 12(2): 1-7.

[46] Ummethala Sandeep, Kemal Juned N, Alam Ahmed S, et al. Hybrid electro-optic modulator combining silicon photonic slot waveguides with high-k radio-frequency slotlines[J]. Optica, 2021, 8(4): 511-519.

[47] Qiu F, Han Y. Electro-optic polymer ring resonator modulators [Invited][J]. Chinese Opt. Lett., 2021, 19(4): 041301.

[48] Lu G W, Hong J, Qiu F, et al. High-temperature-resistant silicon-polymer hybrid modulator operating at up to 200 Gbit·s^{-1} for energy-efficient datacentres and harsh-environment applications[J]. Nat. Commun., 2020, 11(1): 4224.

[49] Lee E S, Kim S M, Yi M H, et al. Coplanar electrode polymer modulators incorporating fluorinated polyimide backbone electro-optic polymer[J]. Photonics, 2020, 7(4): 100.

[50] Zwickel H, Wolf S, Kieninger C, et al. Silicon-organic hybrid (SOH) modulators for intensity-modulation/direct-detection links with line rates of up to 120 Gbit/s[J]. Opt. Express, 2017, 25(20): 23784-23800.

[51] Wang Tianjiao, Zhao Dan, Zhang Meiling, et al. Optical waveguide amplifiers based on $NaYF_4$: Er^{3+}, Yb^{3+} NPs-

PMMA covalent-linking nanocomposites [J]. Optical Materials Express, 2015, 5(3): 469-478.

[52] Zhang M, Zhang W, Wang F, et al. High-gain polymer optical waveguide amplifiers based on core-shell $NaYF_4$/$NaLuF_4$: Yb^{3+}, Er^{3+} NPs-PMMA covalent-linking nanocomposites[J]. Sci. Rep., 2016, 6: 36729.

[53] Sun T, Fu Y, Cao Z, et al. Polymer/silica hybrid waveguide amplifier at 532 nm based on $NaYF_4$: Er^{3+}, Yb^{3+} nanocrystals[J]. Opt. Lett., 2021, 46(21): 5385-5388.

[54] Sun Tonghe, Fu Yuewu, Zhang Xucheng, et al. Gain enhancement of polymer waveguide amplifier based on $NaYF_4$: Er^{3+}, Yb^{3+} nanocrystals using backward pump scheme[J]. Optics Communications, 2021, 488.

[55] Fu Y, Yang Y, Sun T, et al. Polymer-based S-band waveguide amplifier using $NaYF_4$: Yb, Tm-PMMA nanocomposite as gain medium[J]. Opt. Lett., 2022, 47(1): 154-157.

[56] Grivas C, Pollnau M. Organic solid-state integrated amplifiers and lasers[J]. Laser Photon. Rev., 2012, 6(4): 419-462.

[57] Bradley J D B, Pollnau M. Erbium-doped integrated waveguide amplifiers and lasers[J]. Laser Photon. Rev., 2011, 5(3): 368-403.

[58] Pichler E, Bethmann K, Kelb C, et al. Rapid prototyping of all-polymer AWGs for FBG readout using direct laser lithography[J]. Opt. Lett., 2018, 43(21): 5347-5350.

[59] Nesic A, Blaicher M, Hoose T, et al. Photonic-integrated circuits with non-planar topologies realized by 3D-printed waveguide overpasses[J]. Opt. Express, 2019, 27(12): 17402-17425.

[60] Gao Lei, Sun Jie, Sun Xiaoqiang, et al. Low switching power 2 × 2 thermo-optic switch using direct ultraviolet photolithography process[J]. Opt. Communications, 2009, 282(20): 4091-4094.

[61] Chen Changming, Zhang Feng, Wang Hui, et al. UV curable electro-optic polymer switch based on direct photodefinition technique[J]. IEEE J. Quantum Electron, 2011, 47(7): 959-964.

[62] Kim Ky J, Oh M C, Moon S R, et al. Flexible polymeric tunable lasers for WDM passive optical networks[J]. J. Lightwave Technol., 2013, 31(6): 982-987.

[63] Chen C, Niu X, Han C, et al. Monolithic multi-functional integration of ROADM modules based on polymer photonic lightwave circuit[J]. Opt. Express, 2014, 22(9): 10716-27.

[64] Liu Yu, Sun Yue, Yi Yun-Ji, et al. All polymer asymmetric Mach-Zehnder interferometer waveguide sensor by imprinting bonding and laser polishing[J]. Chinese Phys. B, 2017, 26(12):.

[65] Ye Yuting, Ma Hui, Sun Chunlei, et al. Research progress on flexible photonic materials and devices[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 030001.

[66] Chen Changming, Yi Yunji, Wang Fei, et al. Ultra-long compact optical polymeric array waveguide true-time-delay line devices[J]. IEEE J. Quantum Electron, 2010, 46(5): 754-761.

[67] Yan Yunfei, Zheng Chuantao, Liang Lei, et al. Response-time improvement of a 2 × 2 thermo-optic switch with polymer/silica hybrid waveguide [J]. Optics Communications, 2012, 285(18): 3758-3762.

[68] He Guobing, Ji Lanting, Gao Yang, et al. Low power 1×4 polymer/SiO_2 hybrid waveguide thermo-optic switch[J]. Optics Communications, 2017, 402: 422-429.

[69] Tian Liang, Sun Yue, Cao Yue, et al. Polymer/silica hybrid waveguide Bragg grating fabricated by UV-photobleaching [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(7): 603-606.

[70] Fu Yuewu, Sun Tonghe, Zhang Meiling, et al. Polymer/silica hybrid waveguide Y-branch power splitter with loss compensation based on $NaYF_4$: Er^{3+}, Yb^{3+} nanocrystals [J]. Chinese Phys. B, 2019, 28(10): 104206.

[71] Yang Liu, Yang Bo, Sheng Zhen, et al. Compact 2 × 2 tapered multimode interference couplers based on SU-8 polymer rectangular waveguides[J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 93(20): 418.

[72] Yang Bo, Yang Liu, Hu Rui, et al. Fabrication and characterization of small optical ridge waveguides based on SU-8 polymer[J]. J. Lightwave Technol., 2009, 27(18): 4091-4096.

[73] Dai Daoxin, Yang Bo, Yang Liu, et al. Compact microracetrack resonator devices based on small SU-8 polymer strip waveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(4): 254-256.

[74] Yang Bo, Zhu Yunpeng, Jiao Yuqing, et al. Compact arrayed waveguide grating devices based on small SU-8 strip waveguides[J]. J. Lightwave Technol., 2011, 29(13): 2009-2014.

[75] Sato K. Realization and application of large-scale fast optical circuit switch for data center networking[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(7): 1411-1419.

[76] Biberman A, Bergman K. Optical interconnection networks for high-performance computing systems[J]. Rep. Prog. Phys., 2012, 75(4): 046402.

[77] Beausoleil R G, McLaren M, Jouppi N P. Photonic architectures for high-performance data centers[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2013, 19(2): 3700109-3700109.

[78] Chen Xiaoliang, Proietti Roberto, Fariborz Marjan, et al. Machine-learning-aided cognitive reconfiguration for flexible-bandwidth HPC and data center networks [Invited][J]. J. of Optical Communications and Networking, 2021, 13(6): C10-C20.

[79] Ding Y, Kamchevska V, Dalgaard K, et al. Reconfigurable SDM switching using novel silicon photonic integrated circuit

[J]. Sci. Rep., 2016, 6: 39058.

[80] Grieco Andrew, Porter George, Fainman Yeshaiahu. Integrated space-division multiplexer for application to data center networks[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2016, 22(6): 1-6.

[81] Li Chenlei, Wu Hao, Tan Ying, et al. Silicon-based on-chip hybrid (de) multiplexers [J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(8): 1-14.

[82] Liu Jun, Huang Qingzhong, Tao Shiqi, et al. Low-cost hybrid integrated 4×2 578 Gb/s CWDM TOSA for 10 km transmission using DFB-LDs and an arrayed waveguide grating multiplexer[J]. Photonics Res., 2018, 6(11):.

[83] Yun S J, Han Y T, Kim S T, et al. Compact hybrid-integrated 4×80-Gbps TROSA module using optical butt-coupling of DML/SI-PD and silica AWG chips [J]. J. Lightwave Technol., 2021, 39(8): 2468-2475.

[84] Puttnam Benjamin J, Rademacher Georg, Luís Ruben S. Space-division multiplexing for optical fiber communications [J]. Optica, 2021, 8(9): 1186-1203.

[85] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7 (5): 354-362.

[86] Nakajima Mitsumasa, Suzuki Kenya, Yamaguchi Keita, et al. Multilane photonic spectral processor integrated in a spatial and planar optical circuit for a space-division multiplexing network[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36 (2): 309-317.

[87] Han Y T, Shin J U, Park S H, et al. Fabrication of 10-channel polymer thermo-optic digital optical switch array[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(20): 1556-1558.

[88] Sato H, Miura H, Qiu F, et al. Low driving voltage Mach-Zehnder interference modulator constructed from an electro-optic polymer on ultra-thin silicon with a broadband operation [J]. Opt. Express, 2017, 25(2): 768-775.

[89] Miura Hiroki, Qiu Feng, Spring Andrew M, et al. High thermal stability 40 GHz electro-optic polymer modulators [J]. Opt. Express, 2017, 25(23): 28643-28649.

[90] Guan X, Wang X, Frandsen L H. Optical temperature sensor with enhanced sensitivity by employing hybrid waveguides in a silicon Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt. Express, 2016, 24(15): 16349-56.

[91] Niu Donghai, Wang Xibin, Sun Shiqi, et al. Polymer/silica hybrid waveguide temperature sensor based on asymmetric Mach-Zehnder interferometer [J]. J. of Optics, 2018, 20 (4): 045803.

[92] Niu D, Wang L, Xu Q, et al. Ultra-sensitive polymeric waveguide temperature sensor based on asymmetric Mach-Zehnder interferometer [J]. Appl. Opt., 2019, 58 (5): 1276-1280.

[93] Hofmann M, Xiao Y, Sherman S, et al. Asymmetric Mach-Zehnder interferometers without an interaction window in polymer foils for refractive index sensing[J]. Appl. Opt., 2016, 55(5): 1124-1131.

[94] Girault Pauline, Lorrain Nathalie, Poffo Luiz, et al. Integrated polymer micro-ring resonators for optical sensing applications [J]. J. of Appl. Phys., 2015, 117 (10): 104504.

[95] Wang Chunxue, Yi Pengfei, Li Jiang, et al. Polymer optical waveguide grating-based biosensor to detect effective drug concentrations of ginkgolide A for inhibition of PMVEC apoptosis[J]. Biosensors, 2021, 11(8): 264.

[96] Wang C, Zhang D, Yue J, et al. Optical waveguide sensors for measuring human temperature and humidity with gel polymer electrolytes [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13(50): 60384-60392.

作者简介：

吕昕雨(1999—)，女，硕士研究生，主要研究方向为聚合物光子器件及其驱动技术；

尹悦鑫(1995—)，男，博士研究生，主要研究方向为聚合物、硅基三维混合集成芯片；

李　悦(1997—)，女，硕士研究生，主要研究方向为有机无机混合集成光子器件；

张大明(1970—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为平面集成光路器件及其集成技术。