

# 柔性光子材料与器件的研究进展

叶羽婷<sup>1,2</sup>, 马辉<sup>3</sup>, 孙春雷<sup>1,2</sup>, 陈泽群<sup>1,2</sup>, 吴江宏<sup>1,2</sup>, 陈怡琦<sup>1,2</sup>, 罗邲<sup>1,2</sup>, 林宏焘<sup>3</sup>, 李兰<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>西湖大学工学院浙江省 3D 微纳加工和表征研究重点实验室, 浙江 杭州 310024;

<sup>2</sup>浙江西湖高等研究院前沿技术研究所, 浙江 杭州 310024;

<sup>3</sup>浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027

**摘要** 柔性光子器件不受传统光电子器件刚性物理状态限制, 可弯曲、可折叠、可拉伸的形式使得器件独特的光电性质得以实现和调控, 极大拓展了传统光电子器件的发展模式与应用空间。结合新功能光学材料、器件集成技术以及光子器件较电子器件在物质特异性传感、信道容量和抗电磁干扰能力上的优势, 柔性光子技术在多学科交叉融合领域的前沿方向, 如可穿戴传感、高速光互连、光场调控、生物光遗传等展现出巨大的研究和应用价值。然而目前存在柔性集成光子器件加工制备难、机械柔韧性有限、集成化程度低等挑战。针对以上问题简要回顾了近年来研究人员在柔性光子材料与器件方面取得的研究进展并对其相关技术应用前景进行了总结和展望。

**关键词** 集成光子; 柔性光子器件; 光学玻璃; 纳米力学设计; 单片集成; 共形传感

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030001

## Research Progress on Flexible Photonic Materials and Devices

Ye Yuting<sup>1,2</sup>, Ma Hui<sup>3</sup>, Sun Chunlei<sup>1,2</sup>, Chen Zequn<sup>1,2</sup>, Wu Jianghong<sup>1,2</sup>,  
Chen Yiqi<sup>1,2</sup>, Luo Ye<sup>1,2</sup>, Lin Hongtao<sup>3</sup>, Li Lan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of 3D Micro/Nano Fabrication and Characterization of Zhejiang Province,  
School of Engineering, Westlake University, Hangzhou, Zhejiang 310024, China;

<sup>2</sup>Institute of Advanced Technology, Westlake Institute for Advanced Study, Hangzhou, Zhejiang 310024, China;

<sup>3</sup>College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Flexible photonic devices, which are bendable, foldable, and even stretchable, are not limited to the rigid physical state constraints of traditional optoelectronic devices and thus unique tunable optoelectronic properties could be achieved, which greatly expands the development and practical implementation of traditional optoelectronic devices. Combining with new functional optical materials, novel device integration technologies, and the advantages of photonic devices over electronic devices in material sensing specificity, channel capacity, and resistance to electromagnetic interference, flexible photonic devices show great research and application value in emerging and interdisciplinary fields such as wearable sensing, high-speed optical interconnect, light field manipulation, and optogenetic applications in biology. However, challenges including the fabrication difficulties, mechanical flexibility limitation, and the degree of integration exist in current flexible photonic technologies. This paper briefly reviews the recent progress on flexible photonic materials and devices to address those challenges. And further development and application demonstration for the flexible photonics has also been summarized and discussed.

**Key words** integrated optics; flexible photonic devices; optical glasses; nanomechanical design; monolithic integration; conformal sensing

**OCIS codes** 130.3120; 130.2755; 220.4610; 310.6845

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2020-01-29; 录用日期: 2020-02-02

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203003)

\* E-mail: lilan@westlake.edu.cn

## 1 引言

相较于传统电子器件,光子器件在高速低延迟信息传输、生物化学无标定检测、无创刺激、低能耗、抗电磁干扰等方面具有明显的优势,同时作为多学科交叉融合而产生的新型柔性光子技术,突破了硬质器件本征机械束缚,以一种崭新的形式极大地拓展了柔性电子和传统光子器件的功能性,在通信<sup>[1-3]</sup>、生物技术<sup>[4-5]</sup>、多功能表皮传感<sup>[6-7]</sup>等新兴领域都有广泛的应用前景。

与以晶体管、电阻、电容、电感为核心器件单元的电学系统不同,光子链路有着种类更多的以光为信息载体并对光进行生成、耦合、分离、隔离、偏振控制、切换、调制、检测等的器件单元,包括光波导、耦合器、分束器、谐振腔等无源器件和激光器<sup>[8-9]</sup>、调制器<sup>[10-11]</sup>、探测器<sup>[12-13]</sup>等有源器件。这些传统的平面光子器件一般都是在刚性衬底上制备完成,机械拉伸、弯曲等形变都会使得器件应用受到一定的限制。目前要在柔性衬底上制备光子器件还存在加工难、机械柔韧性有限、集成化程度低等诸多挑战。

为了实现机械性能和光学性能的最优化,柔性光子技术的发展需要综合考虑光学材料的最优选择、结构的精简稳固设计、低成本低难度工艺开发以及相关技术在器件大规模多功能集成上的可拓展性。本文将围绕这些因素,从材料、器件结构、制备方法以及应用等方面介绍柔性光子目前的研究状况,总结了用于制备柔性光子器件的衬底和光学器件核心材料,介绍了实现柔性光子器件可弯曲可拉伸性的几种典型的器件机械结构设计,讨论了柔性光子器件的制备方法,重点介绍转移、单片集成、混合集成方法,概述了柔性光子器件在物理、化学、生物信号传感,光互连,光学调控,柔性超表面,光遗传学等领域的应用前景。

## 2 制备材料

柔性光子器件要求器件在弯曲、折叠、拉伸等各种机械形变下,不影响器件的功能,因此需要在材料选择、器件设计、制备工艺等方面做出异于传统光子器件的考量。本章首先介绍了制备柔性光子器件的常用材料(聚合物、半导体纳米薄膜、低维材料、无机非晶氧化物和玻璃材料),然后对这几类材料在器件应用方面的优劣之处进行了比较。

聚合物具有良好的机械柔韧性、电绝缘性、光透明性和稳定性,是柔性光电器件衬底材料的不二选

择。目前常用的柔性衬底材料包括聚二甲硅氧烷(PDMS)<sup>[14-15]</sup>、聚酰亚胺(PI)<sup>[16]</sup>、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)<sup>[17]</sup>、聚(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯)(SBS)<sup>[18-20]</sup>、聚氨酯(PU)<sup>[21]</sup>、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)<sup>[22]</sup>和聚对二甲苯(PX)<sup>[23]</sup>等。根据终端器件的应用需求,可以选择具有不同抗拉伸、抗弯曲、抗腐蚀或者生物相容性的聚合物衬底。例如,PDMS是一种具有高弹性、透明性和生物相容性的橡胶,工作温度在 $-50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,具有较低的杨氏模量,能承受120%以上的可逆拉伸,常用于可拉伸器件的衬底材料。Wilbur等<sup>[24]</sup>以PDMS为光栅衬底,将液态镓或水银置于光栅表面,制作了弹性衍射光栅,拉伸次数达500次以上。Choi等<sup>[25]</sup>采用软模法制备了以PDMS为包层,具有45个微镜耦合的SU-8光波导阵列,如图1(a)所示。PI通常也被称为Kapton胶带,其工作温度在 $-269\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,能承受一定程度的弯曲、扭曲等机械形变和高温加工工艺,也是一种常用的柔性衬底材料。Bosman等<sup>[26]</sup>利用PI作为支撑层制备了柔性波导,如图1(b)所示,当弯曲半径小至2.5 mm时,波导也没有出现明显的损耗。此外,聚合物还可以作为核心光学材料,用以制备光波导<sup>[25,27]</sup>、滤波器<sup>[28-29]</sup>、激光器<sup>[30-31]</sup>和调制器<sup>[32]</sup>等光子器件单元。虽然聚合物在柔性光子领域应用广泛,但是也受到一定的限制。普通聚合物材料的折射率范围一般为1.45~1.7,导致器件结构尺寸偏大,难以实现高密度集成,且在较小弯曲半径下伴随明显的光学损耗。另外,聚合物中普遍存在C—H键,其二倍频、三倍频峰在近红外波段存在吸收<sup>[33]</sup>,限制器件的应用波长范围。从制备工艺来看,一般聚合物很难承受较高的加工温度( $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),阻碍了与其他光学功能材料的集成,限制了其光子器件多功能性的拓展。因此,为了进一步发掘柔性光子的应用范围,有必要研究其他材料体系。

除了利用材料的本征柔性,考虑到弯曲引起的表面应力与薄膜厚度呈正相关,也可以通过减小光学材料的厚度来增强器件的机械柔性。例如:将半导体纳米薄膜、新型低维材料、亚微米厚度光学玻璃薄膜材料集成在柔性聚合物衬底上,可实现具有更多功能性的柔性光子器件。

通过剥离或者转移法得到的半导体纳米膜(NMs)通常可以维持单晶薄膜材料的高载流子迁移率和光学性能,是制备高性能柔性有源光电器件的首要选择。Seo等<sup>[34]</sup>演示了基于可转移的背栅调控的单晶硅纳米膜(Si NM)柔性光电晶体管,如

图 1(c)所示。将 Si NM 作为顶层能够使有源区完全暴露在入射光下,从而能够有效地感测光,该器件在较小曲率半径(15 mm)下弯曲时响应度变化小于 5%。此外,近年来基于 Si NMs 的柔性光电器件还包括 p-i-n 光电二极管<sup>[35]</sup>、分布式布拉格反射镜(DBR)<sup>[36]</sup>和太阳能电池<sup>[37]</sup>等。这些器件在弯曲和拉伸条件下仍旧能够表现出优异的光电性能。然而由于 Si 在 1.3~1.5  $\mu\text{m}$  波段外量子效率很低,不适合作为近红外波段的光敏材料。相比之下,锗(Ge)的带隙相对较小(0.67 eV),适用于 1.3~1.5  $\mu\text{m}$  光通信系统,因此,开发基于 Ge 的光电器件是非常有必要的。Kim 等<sup>[38]</sup>设计了基于柔性 Ge 纳米膜(Ge NM)的金属-半导体-金属(MSN)光电二极管,利用弯曲夹具研究了单轴拉伸应变对其性能的影响,如图 1(d)所示。在 1.5  $\mu\text{m}$  波长光辐射下,当拉伸应变达到 0.42% 时,光响应率从 0.2 A/W 增加到 0.45 A/W。在波长 1.64  $\mu\text{m}$  光辐射下也观察到较强的光电响应,这是由于单轴拉伸应变有效地降低了 Ge NM 的带隙,导致光吸收向长波长移动。此外,Ge NM 还可用于微波开关<sup>[39-40]</sup>、激光器<sup>[41]</sup>等。除了 Si 和 Ge,II-V 族半导体也被广泛应用到柔性器件的研究中。Yang 等<sup>[42]</sup>将 InP 半导体纳米膜转移到 PET 衬底上,实现了 3 mm<sup>2</sup> 衬底上的大面积光电探测器。Fan 等<sup>[43]</sup>设计了一个薄膜 InGaAs p-i-n 光电二极管阵列,如图 1(e)所示,该器件以 Kapton 胶带为衬底,在短波红外光谱范围内达到的外量子效率约为 100%。

低维纳米材料也因其独特的电学、光学、热学和力学特性而受到广泛关注,是开发新一代柔性微纳光电子器件的重要材料选择。二维层状材料,如石墨烯和过渡金属硫化物(TMDs),在过去 10 年中引起了研究人员极大的兴趣。虽然石墨烯具有很高的迁移率,但零带隙结构导致基于石墨烯的光电探测器具有很大的暗电流,很难作为增益介质用于发光器件。与石墨烯相比,在可见光和近红外波段具有天然直接带隙的单层(1L) TMDs 作为二维半导体开始受到越来越多的关注。Zheng 等<sup>[44]</sup>使用脉冲激光沉积法(PLD)制备了大面积和高结晶度二硒化钨(WSe<sub>2</sub>)薄膜,实现了一种柔性、透明、高稳定性和超宽带光电探测器,如图 1(f)所示。Velusamy 等<sup>[45]</sup>制备了二硒化钼(MoSe<sub>2</sub>)和二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)复合材料光电探测器<sup>[46]</sup>,即使弯曲半径小至 200  $\mu\text{m}$ ,该器件依然有良好的光电响应。除了二维材料,一维纳米线在各种异质衬底如硅、金属、金刚

石和二维(2D)材料<sup>[47-49]</sup>上的发展也取得了可喜的进展。Dai 等<sup>[50]</sup>报导了基于金属有机化学气相沉积(MOCVD)法生长核/壳 InGaN/GaN 纳米线的大面积全柔性蓝光 LED。器件在多次弯曲(弯曲半径:3 mm)和没有任何保护封装环境下存储超过一个月都能正常电致发光,如图 1(g)所示。Chen 等<sup>[51]</sup>在柔性 PET 衬底上组装了大规模 InP 纳米线阵列光电探测器,器件具有良好的响应性、柔性、可折叠性和稳定性。零维材料量子点的三维量子限域效应使其具有与三维体材料不同的光电性能,近年来基于半导体量子点的发光器件、探测器等光电器件受到了相关领域学者的广泛关注<sup>[52-55]</sup>,是拓展柔性光子功能性集成的重要材料选择。

半导体薄膜、低维材料等在柔性光电器件的发展中展示了巨大的应用潜力,但也存在亟待解决的问题,如半导体薄膜很难在柔性基底上直接生长和集成,目前也没有能够有效制备大面积高品质二维材料的方法等。无机非晶材料与单晶材料相比,在加工和集成过程中有明显优势,并且可以在不受晶格匹配约束的聚合物衬底上直接生长。多层垂直集成光子结构也可以很容易地通过多个顺序沉积和微纳加工步骤来实现。目前用来制备光子器件的无机非晶材料包括非晶硅(a-Si)<sup>[56-59]</sup>、氮化硅(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)<sup>[60-61]</sup>、氧化物(如 TiO<sub>2</sub>)<sup>[62-64]</sup>、玻璃<sup>[65-69]</sup>等。当不同的材料与衬底集成时,选择一种与聚合物衬底工作温度相容的沉积工艺是非常重要的。蒸发和溅射是最常见的物理气相沉积(PVD)技术之一,然而溅射沉积的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 a-Si 薄膜由于存在硅悬空键而表现出很大的光学损耗,因此不适合于高性能柔性光子应用<sup>[70-71]</sup>。Fan 等<sup>[72]</sup>将 a-Si 薄膜用低温等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法沉积在聚酯衬底上(工作温度:200  $^{\circ}\text{C}$ ),制备了柔性光子应变传感器,如图 1(h)所示。然而,较低的沉积温度无法保证薄膜质量,制备的器件光学损耗高达 100 dB/cm。Rangarajan 等<sup>[73]</sup>采用 PECVD 法沉积氮化硅薄膜,在 150  $^{\circ}\text{C}$  下制备的薄膜具有较低的光学损耗(<3 dB/cm),这也为高性能柔性光子器件的制备提供了新方法。溶液处理法(如溶胶-凝胶、自旋涂层、浸涂涂层等)为 PVD 和 CVD 沉积技术提供了低成本、有望大面积制备的替代方法,但是残留溶剂和微观结构不均匀会导致光传输损耗变大,仍需对该方法做出进一步优化处理。在寻找用于柔性集成光子学的下一代材料的过程中,可以发现玻璃这种传统意义上的脆性材料具有很大的应用

潜力,如硫系玻璃材料,它在红外波段具有宽透明波段窗口、高可调折射率、高热、化学稳定性、可进行低温沉积、可与不同衬底兼容等特点。在低温条件下

(<200 °C)的有机聚合物基板上直接沉积和加工,实现了首个单模可拉伸光子器件<sup>[74]</sup>,如图 1(i)所示。

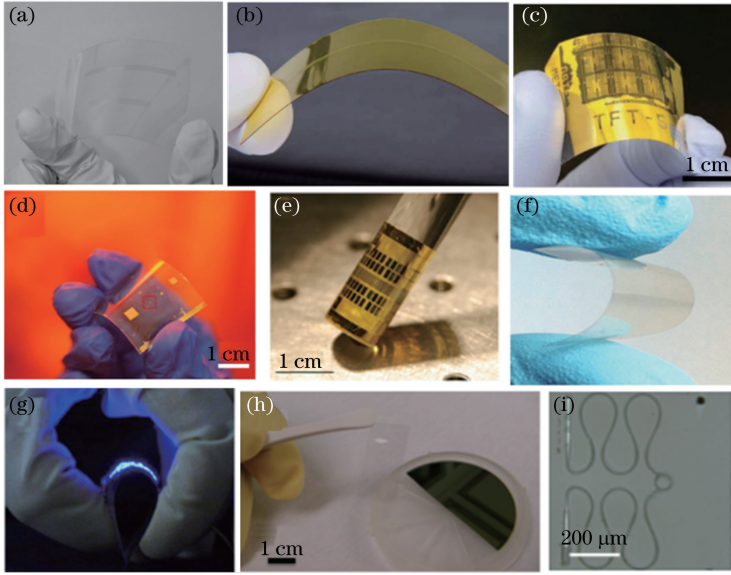


图 1 基于不同材料体系的柔性光子器件。(a)以 PDMS 为包层的柔性聚合物波导<sup>[25]</sup>; (b)以 PI 为包层的柔性光波导<sup>[26]</sup>; (c)柔性 Si NM 光电晶体管<sup>[34]</sup>; (d)基于 PET 的 Ge NM MSM 光电二极管阵列<sup>[75]</sup>; (e)基于 Kapton 胶带的 8×100 InGaAs 薄膜 p-i-n 光电二极管阵列<sup>[43]</sup>; (f)弯曲状态下的 WSe<sub>2</sub> 光电探测器图像<sup>[44]</sup>; (g)LED 在弯曲半径为 3.5 mm 下发射蓝光的照片<sup>[50]</sup>; (h)非晶硅应变传感器<sup>[72]</sup>; (i)可拉伸玻璃波导光学显微镜图<sup>[74]</sup>

Fig. 1 Flexible photonic devices based on different materials. (a) Flexible polymer waveguide cladded in PDMS<sup>[25]</sup>; (b) flexible optical waveguide cladded in PI<sup>[26]</sup>; (c) flexible Si NM phototransistor<sup>[34]</sup>; (d) array of Ge NM MSM photodiodes on PET substrate<sup>[75]</sup>; (e) 8 × 100 thin-film InGaAs p-i-n photodiode array fabricated on flexible Kapton foil<sup>[43]</sup>; (f) optical image of fabricated WSe<sub>2</sub> photodetectors under bending state<sup>[44]</sup>; (g) photograph of LED emitting blue light at curvature radius of 3.5 mm<sup>[50]</sup>; (h) fabricated amorphous silicon strain sensor<sup>[72]</sup>; (i) optical microscopy of stretchable glass waveguide<sup>[74]</sup>

### 3 结构设计

无论是柔性聚合物、硬性半导体薄膜还是脆性玻璃,都只能承受一定程度范围内的机械应力。当应变较大时,材料内部容易劣化,导致裂纹形成,造成光传输损耗增大,电阻增大,电子迁移率降低等。这就需要从器件结构设计考虑,确保器件在大变形(小半径弯曲、拉伸、对折、扭曲)下所受拉伸或者压缩最小化,最大程度维持光子材料性能和器件功能。下面将介绍一些典型设计方案,如采用多中性面结构、蜿蜒结构、分立结构、局部硬化处理等提高光子器件的机械弯曲和拉伸性能。

#### 3.1 多中性面结构设计实现器件可弯曲性

在多层膜简单弯曲的情况下,可以构建一个中性面来实现器件所受应力、应变最小化。这里的中性面是指没有受到应力的平面。如图 2(a)所示,如果柔性衬底是由多层薄膜组成,可以把核心光学器

件层放置在多层堆叠薄膜的中性面上,这样能最大程度渐少器件在弯曲过程中的形变。假设这个多层膜结构第 1 层在顶部,第  $n$  层在底部,在经典欧拉-伯努利梁弯曲理论中,中性面的位置可以表示为

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i d_i \left[ \left( \sum_{j=1}^i d_j \right) - \frac{d_i}{2} \right]}{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i d_i}, \quad (1)$$

式中: $\bar{E}_i = E_i / (1 - \nu_i^2)$ 代表平面应变杨氏模量,其中  $\nu_i$  是泊松比; $d_i$  是第  $i$  层的厚度。该经典理论是假设在线性力学、纯弯曲、小形变(弯曲半径  $r \gg \sum_{i=1}^n d_i$ )以及层间没有滑动的情况下给出的,横截面弯曲之后依然保持平坦,没有产生切应变<sup>[76]</sup>。基于简单弯曲理论,多层膜弯曲引起的拉伸应变可以表示为

$$\epsilon = \frac{\gamma}{\rho}, \quad (2)$$

式中: $\gamma$  为点到中性轴的距离; $\rho$  为中性轴的半径。因

此,离中性轴面越近,器件在弯曲时受到的应变越小。柔性电子技术基于多中性面结构,可制备一系列超柔性电子单元器件和 CMOS 集成柔性电路<sup>[77-79]</sup>。

光子器件不能简单采取这个方案来实现器件的柔韧性。根据(1)式,应变为零的中性面通常在多层薄膜中间部分,光子器件单元如果处于聚合物薄膜深处,光波导倏逝波穿透深度有限,难以与外部环境相互作用,这将大大限制光子器件单元间的耦合和其生物化学传感功能的发挥。另外,柔性聚合物衬底是热的不良导体,厚聚合物包层会阻碍有源光子器件散热进而影响器件光电性能。解决这个问题的一个方法是直接在相对薄( $<50\ \mu\text{m}$ )的柔性衬底上制备光子器件,例如基于半导体纳米薄膜的柔性光子器件<sup>[38,80-83]</sup>,尽管这些器件层并未与中性面对齐<sup>[76]</sup>,但是仍表现出一定的柔韧性,只是通常允许弯曲半径大于 5 mm。要实现小半径弯曲而不影响器件光电性能发挥,就必须把光学器件层放在中性面位置且同时尽量靠近衬底表面。2014 年本课题组提出了多中性面理论,用于指导亚毫米弯曲半径

的超柔性光子器件的制备<sup>[84-85]</sup>。如图 2(b)所示,在多层膜中引入一层具有低杨氏模量(约 MPa)的弹性聚合物层,弯曲的时候,该弹性体层会发生大的剪切变形,降低了位于其上下层有高杨氏模量(约 GPa)的聚合物层中的应变<sup>[86]</sup>。这里的多层膜间杨氏模量失配严重,使得经典弯曲梁理论失效,借助于分段函数的多中性轴理论,以图 2(b)所示结构为例,其中  $50\ \mu\text{m}$  厚的 PDMS 层(杨氏模量为 2 MPa)被夹在各自厚度为  $10\ \mu\text{m}$  的 PI 层(杨氏模量为 2.5 GPa)之间,形成三层结构,计算该多层膜在弯曲情况下的应力分布。弯曲时,PDMS 层实际上使两个 PI 层中的面内应变解耦,并充当有效的应变缓释剂,在上下两 PI 层中分别产生两个中心面,与相同厚度的单个 PI 层相比,多层堆叠表面上的应变降低为  $1/6$ <sup>[85]</sup>。采用这种机械设计制备了基于硫系玻璃<sup>[84]</sup>、 $\text{TiO}_2$ <sup>[87]</sup>、 $\text{InGaAs}$ <sup>[88]</sup> 的各种光波导、谐振腔探测器等器件,展示了近乎可以折叠的光子器件[弯曲半径为 0.25 mm,如图 2(c)所示]<sup>[87]</sup>和高品质柔性光学谐振腔[图 2(d)]<sup>[84]</sup>。

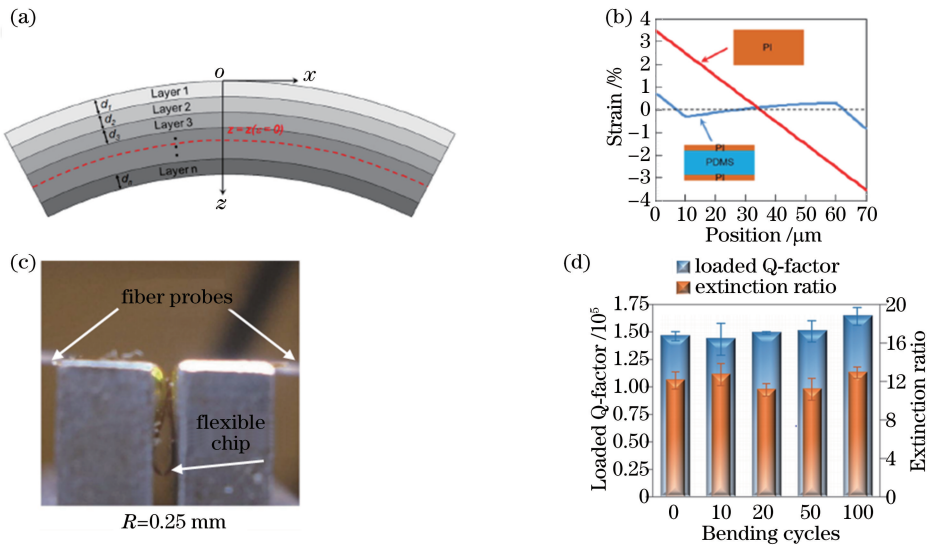


图 2 多中性面结构设计。(a) 多层结构的纯弯曲,其顶面和底面分别承受拉伸和压缩应变,中性平面位置由(1)式指定<sup>[85]</sup>; (b) 弯曲半径为 1 mm 的两种薄膜结构中应变分布的有限元模拟结果,蓝色曲线对应于聚酰亚胺( $10\ \mu\text{m}$ )-有机硅( $50\ \mu\text{m}$ )-聚酰亚胺( $10\ \mu\text{m}$ )三层结构中的应变分布,红色曲线表示相同总厚度( $70\ \mu\text{m}$ )的单个聚酰亚胺层中的应变分布<sup>[85]</sup>; (c) 可折叠的光子器件(弯曲半径小至 0.25 mm)<sup>[87]</sup>; (d) 光学谐振腔在不同弯曲次数后的品质因子和消光比(弯曲半径为 0.5 mm)<sup>[84]</sup>

Fig. 2 Design of multi-neutral plane structure. (a) Pure bending of multi-layer structure, whose top and bottom surfaces undergo tensile and compressive strain, respectively. The neutral plane position is specified by Equation (1)<sup>[85]</sup>; (b) finite element simulation results of strain distribution in two thin-film structures with bending radius of 1 mm. The blue curve corresponds to strain in a polyimide ( $10\ \mu\text{m}$ )-silicone ( $50\ \mu\text{m}$ )-polyimide ( $10\ \mu\text{m}$ ) tri-layer structure, and the red curve corresponds to strain in a single polyimide layer with the same total thickness ( $70\ \mu\text{m}$ )<sup>[85]</sup>; (c) foldable photonic devices (with bending radius as small as 0.25 mm)<sup>[87]</sup>; (d) Q-factor and extinction ratio of the resonator after multiple bending at a bending radius of 0.5 mm<sup>[84]</sup>

### 3.2 蜿蜒、分立结构设计实现器件可拉伸性

采用多中性面结构设计可以提高光子器件在反复弯曲下的机械、光电稳定性;但是要实现器件的可拉伸性,拓展柔性光子机械拉伸调控下的应用,就必须将光子器件单元结构设计成蜿蜒弯曲或者分立结构,以减小拉伸时施加于器件结构上的应力。

实现蜿蜒弯曲结构一般采用两种方法。第一种方法是通过机械拉伸、热膨胀或者溶剂溶胀等方式获得预拉伸状态的柔性衬底,然后在柔性衬底上转移或者加工器件单元,随后通过衬底自然预应变释放,使与衬底保持黏附的器件单元薄膜发生弯曲,形成面外蜿蜒连续褶皱结构<sup>[89]</sup>。例如, Yu 等<sup>[90]</sup>在有 30% 预应变的 PDMS 衬底上涂覆纳米厚的金/钼薄膜,然后通过预应变释放制备了亚微米级的周期性正弦光栅,并通过柔性周期光栅结构的可逆拉伸或压缩实现了对衍射光栅的调制。文中提到给该器件施加 30% 的拉伸应变,衍射光栅的谐振波长红移了 85 nm。Lee 等<sup>[91]</sup>也采用类似的方法展示了可拉伸可重构 THz 超材料结构单元,通过由预应变释放获

得的褶皱布局,蜂窝超材料可以可逆拉伸至 52.5% 而不破坏器件结构的完整性和功能性[图 3(a)]。第二种方法是在非拉伸平面衬底上直接制备类似于弹簧的面内蜿蜒结构,如蛇形结构<sup>[92-93]</sup>、岛桥结构<sup>[94-95]</sup>等,柔性电子技术大多采用这种方法来实现电子电路的拉伸性能<sup>[94-95]</sup>。基于蛇形蜿蜒结构方案,从光子器件功能性表达和光学传输损耗抑制方面考虑,进行了如图 3(b)所示的设计。该设计进行了两点改进:1)对蛇形图案函数进行了优化,采用欧拉螺旋设计减小弧线在每一点的曲率突变,大大降低了光波导损耗;2)对器件关键部位进行了局部硬化处理,使对形变敏感的器件单元(如光栅、谐振腔)包覆在刚性“岛屿”上,所以光学器件在大拉伸情况下仍然能正常工作。成功制备了分别以 SU-8 聚合物和硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$  为芯层的可拉伸单模光波导及谐振腔,独特的光学蜿蜒波导设计和局部硬化处理让器件可以承受 3000 次 42% 的重复拉伸,器件光学性能没有明显降低[图 3(c)、(d)]<sup>[74,96]</sup>。

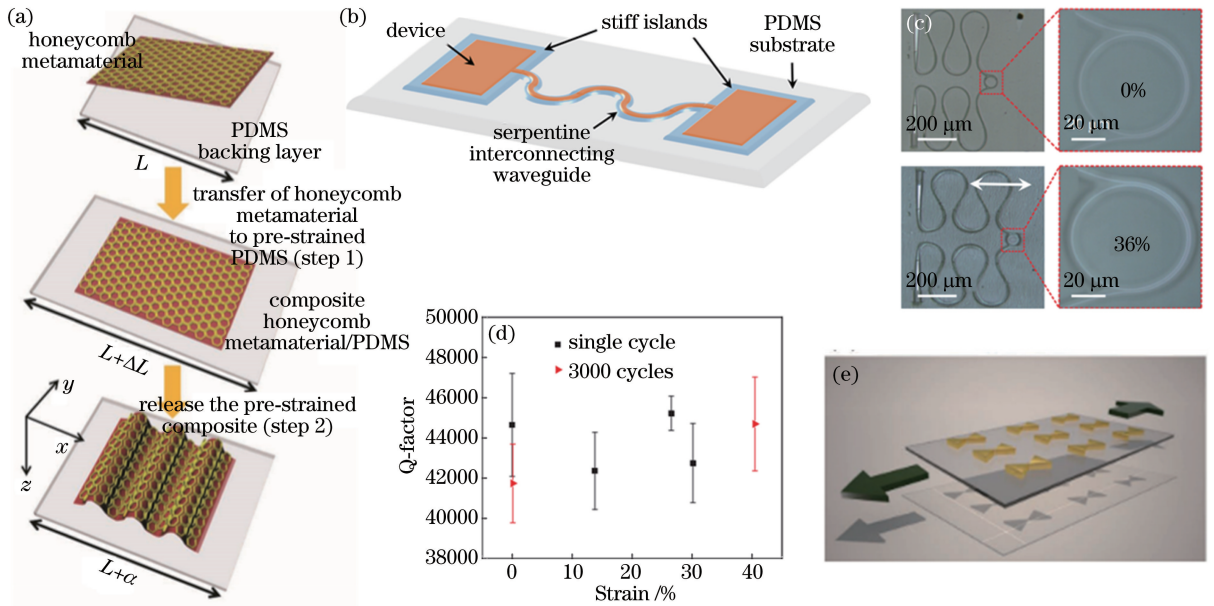


图 3 采用蜿蜒、分立结构制备可拉伸器件。(a)具有褶皱结构的蜂窝超材料的制备过程<sup>[91]</sup>; (b)包含蜿蜒波导和考虑局部硬化的可拉伸集成光子器件设计示意图<sup>[96]</sup>; (c)波导耦合微环谐振腔在拉伸前后(未拉伸和 36% 拉伸)的光学显微镜图<sup>[96]</sup>; (d) 3000 次 42% 重复拉伸前后的光学损耗表征<sup>[96]</sup>; (e)基于金有源层和 PDMS 衬底的柔性蝴蝶形纳米天线阵列超材料薄膜<sup>[97]</sup>

Fig. 3 Meandering and isolated structure based stretchable devices. (a) Procedures for the fabrication of honeycomb metamaterial with wrinkled layouts<sup>[91]</sup>; (b) schematic of integrated stretchable photonic device based on the design of meandering waveguide and local hardening<sup>[96]</sup>; (c) optical micrographs of waveguide coupled microring resonator without tensile strain and with 36% tensile strain<sup>[96]</sup>; (d) measured optical loss at 42% tensile strain for 3000 repetition<sup>[96]</sup>; (e) flexible bow-tie shaped nanoantenna array metamaterial film based on gold active layer and PDMS substrate<sup>[97]</sup>

另外,器件如果为分立的亚波长光栅、超材料结构等周期性纳米阵列,拉伸变形时大部分应变集中在弹性衬底中,由于应变隔离效应,传递到具有高杨氏模量的独立纳米结构单元中的应变已经大大降低。例如,可以通过机械拉伸改变光栅的周期、占空比,对衍射波长进行大带宽空间位置、相位、振幅调控,这在光谱仪<sup>[98-99]</sup>、空间光场调控<sup>[100]</sup>等领域都有所应用。此外,也可以通过机械拉伸改变超材料结构单元的形状、大小和方向,从而改变电磁波结构,实现柔性超材料器件的可重构性、高灵敏度和线性响应<sup>[101-104]</sup>。如图 3(e)所示, Aksu 等<sup>[97]</sup>用纳米模板法在 PDMS 衬底上直接制作了蝴蝶结形状的纳米天线超材料,该器件具有很高的伸缩柔性,可以紧密贴合在非常规形状物体表面,例如光纤、生物组织,实现特殊场景下的传感增强应用。

## 4 制备方法

除了在器件几何结构上进行独特的设计以尽可能提升器件的机械性能,高性能柔性光子器件的实现还必须兼顾器件加工工艺的可靠性、简便性、低成本实施。考虑到传统微纳器件加工过程中高温、射频溅射、化学腐蚀等工艺对柔性聚合物衬底的破坏,迄今为止,大多数柔性光子器件都是基于转印方法完成。本节总结了包含转印、单片集成和混合集成的三类制备柔性光子器件的工艺技术。

### 4.1 转印

转印,是指光子器件单元从刚性衬底转移到

柔性衬底的过程,它允许在一个大规模的平行尺度上对基于硅、玻璃、陶瓷、金属和聚合物等的微纳结构进行操作,重复对准精度可达微米尺度。转印有几种变体,但都涉及从起始基板释放功能层(如晶体半导体 NMs)或结构(如预制器件),并将功能层或结构转移到外部柔性衬底上等过程。图 4 演示了一个通用的转印流程。源材料(如 SOI、GeOI、III-V 多层牺牲层)首先被模压直至牺牲层形成膜(或条状)[图 4(a)、(b)]。然后通过刻蚀牺牲层来释放顶部膜层[图 4(c)],充分释放的膜层通过范德瓦耳斯力落在处理基板上[图 4(d)]。湿法蚀刻步骤要么完全释放器件,并通过范德瓦耳斯力与硅衬底微弱结合;要么留部分氧化层,形成支座结构<sup>[83,105]</sup>。最后,膜转移过程可以采用直接翻转转移或辅助转移方法[图 4(e1)、(e2)、(f1)、(f2)]<sup>[106]</sup>。通过从 SOI 和其他源衬底释放高质量的薄膜材料并将其转移到新的衬底上,使得不同材料系统的集成在刚性和柔性衬底上都变得可行,该方法具有采用各自优化的材料结构、节能以及智能化等优点。转印步骤也可以重复,以产生多层堆叠光子结构<sup>[107]</sup>。除了 Si 外,III-V 半导体<sup>[82,108]</sup>、金属<sup>[109]</sup>、有机半导体<sup>[110]</sup>等许多材料都可以进行转印加工。这个技术可以兼容现有的高温加工技术,但是也需要非常精确地控制转印结构与供给衬底及接收衬底的黏附力关系。目前此技术已经实现了半自动化,可满足实验室及小规模量产的需求。

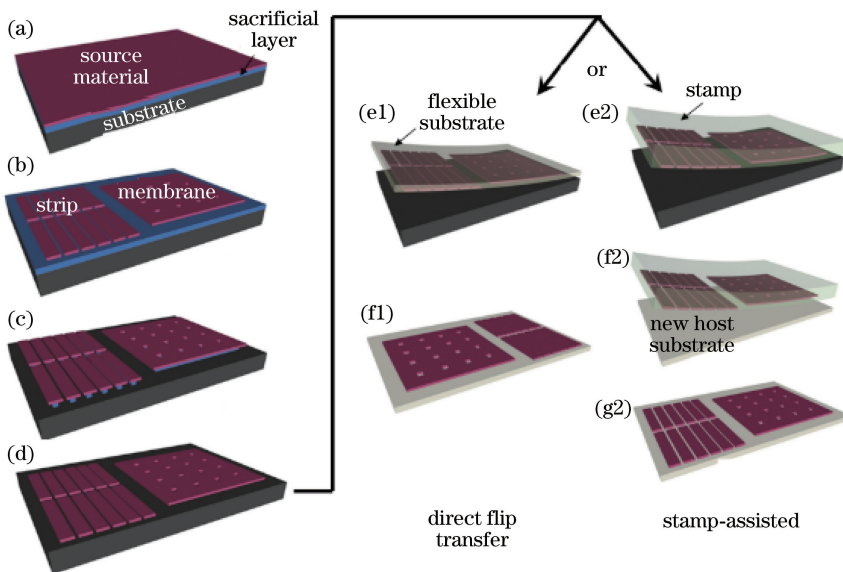


图 4 半导体薄膜释放、转移、堆叠在柔性衬底上的通用过程<sup>[85]</sup>

Fig. 4 General process illustration for semiconductor membrane release, transfer, and stacking<sup>[85]</sup>

## 4.2 单片集成

与转印法相比,直接在柔性衬底上制备光子器件的单片集成方法提供了一种大为简化的替代方案,具有成品率高、可大面积图形化以及与卷对卷工艺兼容等优势。在柔性衬底上制备单片光子器件的典型工艺流程如图 5 所示。首先将柔性聚合物衬底旋涂到刚性处理衬底上,然后通过物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)或溶液法(旋涂和浸涂)沉积薄膜器件层。制备过程中需要确保基片和

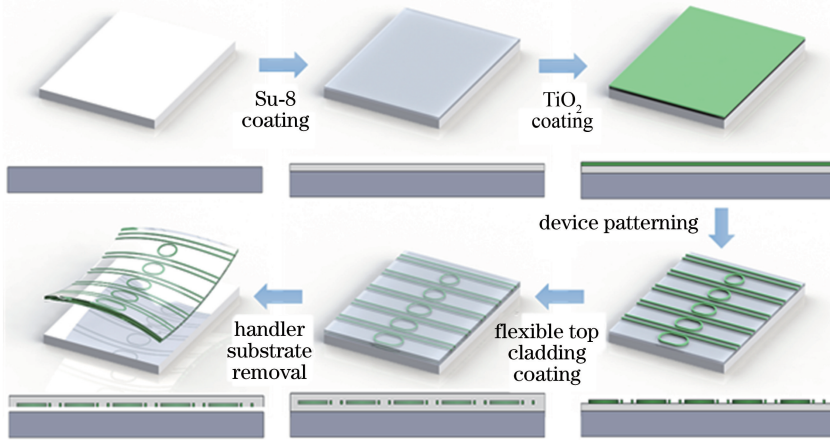


图 5 对柔性光子器件进行单片集成的工艺流程<sup>[87]</sup>

Fig. 5 Fabrication process of monolithic integration of flexible photonic devices<sup>[87]</sup>

除了典型的沉积刻蚀法,喷墨打印、3D 打印等技术也被用来制备柔性器件。喷墨打印是一种成本低、操作简单的光子传感器制造方法,具有几个显著的优点:1)油墨材料制备具有灵活性;2)可精确控制墨滴的位置和大小;3)具有曲面印刷材料的能力。这些特性使得喷墨打印被广泛用于制造柔性、可拉伸的光子传感器。Samusjew 等<sup>[119]</sup>利用喷墨打印方法制作了一种基于光固化技术的可拉伸光波导器件。

## 4.3 混合集成

多功能的柔性光子链路离不开包含金属、半导体、玻璃、聚合物等多种材料的混合集成。而不同的材料系统的混合集成可以通过晶圆键合过程来完成。晶圆键合分为两种:一种是直接的分子键合,另一种是有焊料、玻璃釉料、黏合剂等中间黏附层的键合。

直接分子结合依赖于两个表面之间的范德瓦耳斯力相互作用。由于这是一个短程力,需要接触面的表面粗糙度达到亚纳米级。通常这一技术包括三个步骤:表面处理、衬底相互接触和高温退火,同时衬底在压力下保持接触。表面处理步骤包括氧化物和有机污染物的去除,以及界面结合表面的化学激活。当两个干净光滑的宏观物体接触时,范德瓦耳斯力会使其结合,而在高温退火过程中则会发生化

薄膜表面的平整度和粗糙度,因为表面高度变化可能导致光刻期间的离焦和图像失真,或电子束光刻期间的拼接误差。将薄膜图形化为功能性光子结构是通过等离子体蚀刻<sup>[72]</sup>(注意保持较低的 RF 功率以减少对聚合物衬底的等离子体损伤)、剥离<sup>[111]</sup>、纳米压印<sup>[112]</sup>或纳米模板光刻<sup>[104]</sup>来完成的。单片制备方法已被用于在柔性衬底上制备光波导<sup>[113-114]</sup>、谐振器<sup>[115-116]</sup>、光栅<sup>[117]</sup>和等离子体纳米结构<sup>[118]</sup>等。

学反应和重结晶。Heck 等<sup>[120]</sup>回顾了混合集成硅平台的现状。该技术平台能很好地将硅无源器件和有源器件与使用低损耗和低反射率的锥形模式转换器和选择性区域键合的混合元件集成在一起。

另外一种混合集成的方法就是使用黏合剂把不同材料体系的器件集成在一个柔性衬底上。这种方法的主要优点是当黏合剂润湿晶片表面并填满表面沟槽时,对黏接所需的表面质量要求有所降低,通过旋涂可以使被黏接表面的形貌平面化。此外,黏接过程通常是低温过程,因此减少了由于两种材料的热膨胀不同而产生的应力。然而,目前人们对界面结合的温度稳定性和长期稳定性了解甚少。目前较常用的黏附剂有苯并环丁烯(BCB)和环氧树脂 SU-8。Roelkens 等<sup>[121]</sup>通过使用 1,3-丁二烯-1,1,3,3-四甲基二硅氧烷-偏苯并环丁烯作为键合黏附剂,在 SOI 波导器件上混合集成了 InP/InGaAsP 芯片。图 6 展示了用 SU-8 为黏合剂进行波导与探测器混合集成的工艺过程<sup>[88]</sup>,主要步骤涵盖黏附层(下包覆层)旋涂、芯片键合、衬底移除、探测台面图形化、金属沉积、波导制备、上包覆层沉积、结构释放与黏附等。



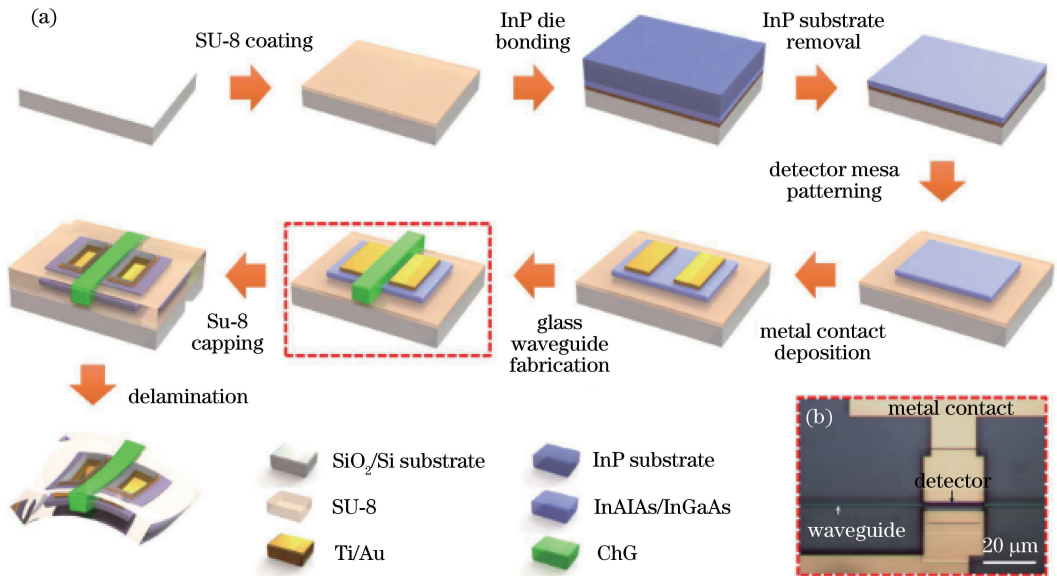


图6 柔性光子器件混合集成工艺。(a)柔性波导集成探测器制备流程图<sup>[88]</sup>；(b)柔性波导集成探测器光学显微图<sup>[88]</sup>  
Fig. 6 Hybrid integration technology for flexible photonic devices. (a) Schematic of fabrication process of flexible waveguide-integrated detector<sup>[88]</sup>；(b) optical micrograph of flexible waveguide integrated detector<sup>[88]</sup>

## 5 应用

以上回顾了柔性光子材料与器件在提高机械柔韧性、简化加工制备步骤、增加功能集成度方面取得的研究进展,这一节将结合柔性光子在高速传输、信道容量、化学检测、抗电磁干扰、精准刺激、可与任意形状衬底表面共形等方面的优势,总结目前柔性光子在传感、光互连、光场调控等新兴领域的应用情况。

### 5.1 物理信号和物质传感

在机械拉伸、压缩或者弯曲作用下,光子器件承载光信号的一个或多个光参量(光强度、波长、频率、相位、偏振等)发生变化,经检测和分析可以直接推导出导致光参量变化的机械作用,因此柔性光子器件常用作弯曲、应变、应力等力学相关物理量的传感器。和其他普通力学传感器相比,基于光学器件设计的力学传感器具有灵敏度高、响应快、抗电磁干扰等优势,同时超薄机械柔性的特点是可与任意形状衬底表面共形,能广泛应用于智能皮肤、智能机器人、航空航天设备、可植入生物组织表面等<sup>[122-129]</sup>。Harnett等<sup>[127]</sup>开发了一种基于光纤的可拉伸低噪声、低滞后的应变传感器,通过对应力应变的测量检测膝关节的承重情况,如图7(a)所示。Karrock等<sup>[126]</sup>制备了一种基于柔性、具有生物相容性衬底的布拉格光栅的变形来测量眼部压力的传感器[图7(b)]。Zhao等<sup>[123]</sup>使用柔性光波导进行假肢的触觉感知(如压力、应变和曲率),如图7(c)所

示。其中机械变形引起的波导形状改变,直接影响了光波导传输中的光功率损耗,进而对假肢的力学触觉信号进行感知。Yun等<sup>[122]</sup>制作了基于聚合物波导的触觉传感器阵列,其具有27个独立的传感像素,如图7(d)所示。该传感器阵列的每个单元都具有优异的力学感应性能。该传感器阵列的响应延迟时间小于10 ms,力学感应灵敏度达到 $0.16 \text{ N}^{-1}$ ,重复性为0.994。Zhang等<sup>[130]</sup>演示了高度敏感的光学皮肤(O-skin),如图7(e)所示,其中主要的感觉元件由光学信号驱动。传感器的结构是通过在聚二甲基硅氧烷(PDMS)的薄层中嵌入玻璃微/纳米纤维(MNFs)实现的。当启用漏电响应的引导模式延长外部刺激时,光学传感器显示出超高灵敏度( $1870 \text{ kPa}^{-1}$ )、较低的检出极限(7 mPa)和超快响应速度( $10 \mu\text{s}$ ),这些指标超过了电子皮肤的性能指标,实现了高频振动、腕部脉搏和人声的无电磁干扰检测<sup>[130]</sup>。

除了机械应力应变,温度、湿度、环境物质、pH值等也会影响光子器件中传输光信号的某些参数,所以柔性光子器件可以紧密贴在皮肤、智能机器人异形表面、植入生物体内组织等,充当除了压力还有物体形状、质地、温度、湿度、pH值等多项物理参数和环境物质传感的多功能触觉传感器。Xu等<sup>[131]</sup>制备了贴附在心脏模型表面的柔性光子器件,同时检测pH、温度和机械应变等,并模拟了光、电、热刺激对其的影响,这对于研制可植入设备以进行快速诊断和精准治疗心脏病有重大意义。

另外,化学、生物物质在不同波长的特异性吸收使得基于光学结构(环形波导、谐振腔、光子晶体、表面等离子体共振)增强吸收的物质传感器具有响应快、灵敏度高且不需要提前标定的优势<sup>[132-138]</sup>。例如, Jin<sup>[138]</sup>等制备了柔性氮化铝(AlN)波导用于含—OH官能团物质的实时检测。Bai等<sup>[135]</sup>制备了可降解的柔性Si波导,用于对生物体内的目标位置进行精确的光传输和传感。利用近红外光谱法监测生物化学

物质如葡萄糖,跟踪生理参数如氧饱和度。其他材料如蚕丝作为生物相容可降解材料,也可制备成光波导,用于生物体内的光学组织成像、化学传感等<sup>[132-134]</sup>。Applegate等<sup>[133]</sup>制备了一种完全由蚕丝素蛋白制成的光波导[图7(f)]。波导芯层是折射率为1.54的丝素蛋白,包层是折射率为1.34的水凝胶,通过与外部光纤连接,该波导能够引导光进入生物组织,实现光传输、物质传感、成像等功能。

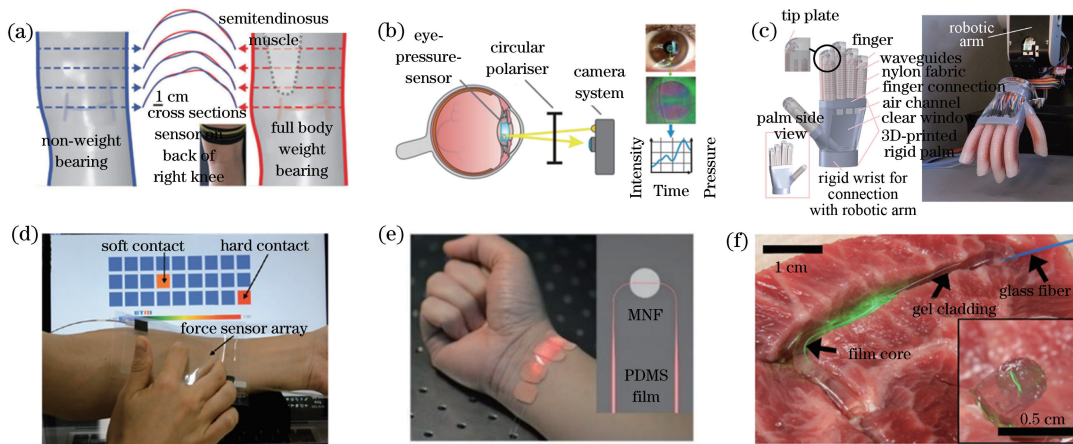


图7 柔性光子器件在传感领域的应用。(a)用于检测膝关节承重情况的柔性光纤<sup>[127]</sup>; (b)基于布拉格光栅变形来测量眼部压力的传感器<sup>[126]</sup>; (c)用于软体机械手电应变传感的可拉伸光波导<sup>[123]</sup>; (d)基于聚合物波导的触觉阵列传感器<sup>[122]</sup>; (e)用于光子皮肤传感的柔性微纳光纤<sup>[130]</sup>; (f)用于生物组织中光传输的蚕丝素蛋白柔性光波导<sup>[133]</sup>

Fig. 7 Applications of flexible photonic devices in sensing field. (a) Flexible fibers for monitoring knees' weight bearing<sup>[127]</sup>; (b) eye pressure sensor based on deformation of periodically nanostructured Bragg grating<sup>[126]</sup>; (c) stretchable optical waveguides based on soft robotic hand for optoelectronic strain sensing<sup>[123]</sup>; (d) polymer waveguide based tactile array sensors<sup>[122]</sup>; (e) flexible micro/nano fibers for photonic skin sensing<sup>[130]</sup>; (f) silk protein flexible waveguide for guiding light in tissue<sup>[133]</sup>

## 5.2 光互连

随着云计算、物联网以及大数据业务的兴起和普及,全球网络流量呈指数增长,这对数据中心的通信提出更高的要求。传统电互连传输技术在高频下能耗过大、带宽受限等方面显示出了逐渐严峻的瓶颈问题。其最终解决方案是结合光自身极大带宽、超快传输速率、低能耗等特性,利用光互连替换电互连来实现芯片间数据传输。目前正在研究几种具有创新性的光互连设计,例如:多芯光纤互连<sup>[139]</sup>、光学印刷电路板<sup>[140-141]</sup>、硅光子学<sup>[142-143]</sup>和混合方法<sup>[144-145]</sup>,这些设计中衬底不具有柔性,使得芯片封装有一定挑战。基于柔性光波导互连的片间光互连方案可以不需要考虑高精度光学校准,波导的两端分别预先耦合到激光器和探测器,再通过电封装连接两个芯片或完成片上互连<sup>[146-150]</sup>。Bosman等<sup>[151]</sup>提出了一个完整的光学互连方案的设计。图8(a)和(b)分别为基于柔性聚合物波导光互连方案示意图和成品器

件,一个垂直腔面发射激光器(VCSEL)和光电二极管都分别耦合到一个2 cm长的柔性波导的两端。Missinne<sup>[146]</sup>等也演示了具有集成光源和探测功能的可拉伸PDMS光学链路,并研究了机械形变对于光互连传输方案的影响[图8(c)]。

然而,由于聚合物波导与柔性衬底折射率差有限,受芯片几何尺寸约束,这类方法都不能扩展到高密度波导集成,进一步限制了信号传输带宽。提出了基于高折射率玻璃波导的柔性光互连传输芯片连接不同计算及存储核心间的通信方案,该方案的双向数据传输带宽可达100 Tbit/cm<sup>2</sup>,为超大规模并行运算中带宽传输受限问题提供一个解决方案,如图8(d)所示<sup>[149]</sup>。该方法同样不需要进行光学对准,片间芯片相连仅仅使用电学接口衔接;具有超低的结构厚度(互连芯片总厚度可缩小至25 μm以下),与倒装芯片焊球阵列封装(BGA)技术兼容;同时高折射率柔性玻璃波导可高密度集成,允许高速

宽带数据传输;且该方案采用一个激光光源和外部调制,和基于每一个波导耦合一个 VCSEL 的传统

方案相比,该方案大大降低了链路能耗,尤其集成密度越大时,能耗优势越明显[图 8(e)].

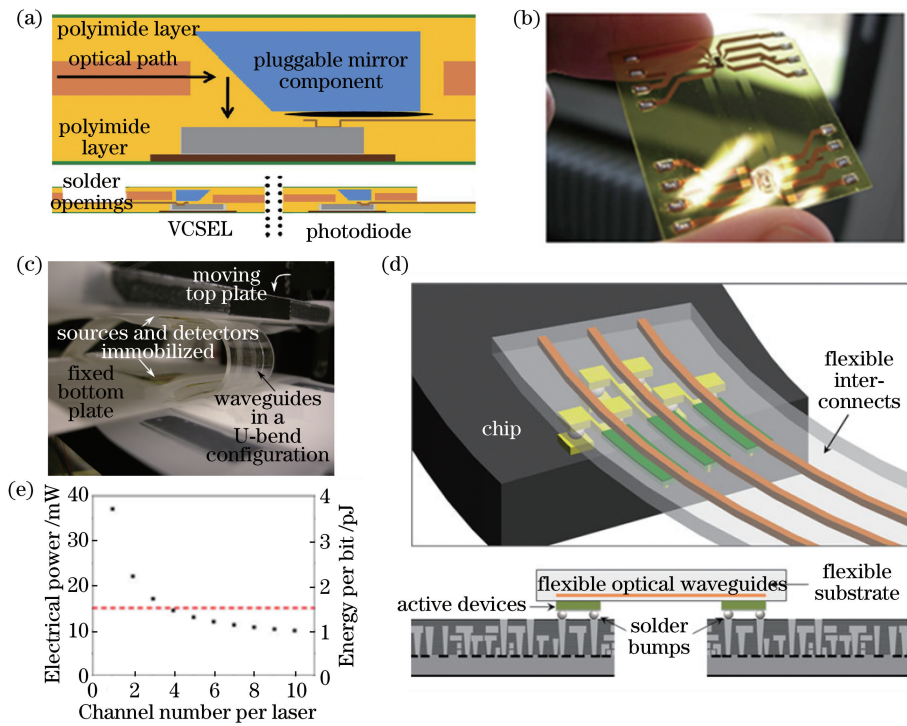


图 8 柔性光子器件在光互连领域的应用。包含聚合物波导、反射镜和光电子元件的全嵌入式光学链路的柔性光互连方案的(a)示意图和(b)器件照片图<sup>[151]</sup>; (c)集成光源、探测器和聚合物波导的可拉伸光学链路<sup>[146]</sup>; (d)柔性高折射率差单模波导高密度集成光互连设计方案示意图; (e)图 8(d)所示方案与基于 VCSEL 的多模波导光互连方案的单通道功耗对比<sup>[149]</sup>

Fig. 8 Flexible photonic devices for optical interconnect. (a) Diagram and (b) photo of flexible optical interconnection scheme using fully embedded optical link with polymer waveguides, mirrors, and optoelectronic components<sup>[151]</sup>; (c) stretchable optical link including integrated light sources, detectors, and polymer waveguide<sup>[146]</sup>; (d) schematic of high-density integration optical interconnect based on high-index contrast single mode flexible waveguide; (e) single channel power consumption comparison of scheme shown in Fig. 8(d) and VCSEL-based multi-mode waveguide interconnect scheme<sup>[149]</sup>

### 5.3 新型光场调控

机械变形为调谐光子器件结构提供了一种独特的方法,因此可以通过大拉伸或者弯曲使器件处在两种截然不同的光学状态(相位、偏振、极化方式、传播模式)下,这种可调谐方式带宽大且具有可重构性,使得柔性光子在新型光场调控<sup>[152-155]</sup>、全息成像<sup>[156]</sup>、虚拟现实/增强现实(VR/AR)技术<sup>[99,157]</sup>等前沿领域也有所应用。例如, Malek 等<sup>[156]</sup>通过各向同性拉伸超表面结构,实现了两个以上全息图片的连续可重构切换[图 9(a)]。此外, Schauer 等<sup>[158]</sup>利用聚合物的可拉伸性,改变布拉格光栅周期,实现波长可调有机半导体分布式反馈激光器[图 9(b)]。

超薄柔性光子器件也可以集成在任意几何形状的基底上,对于增强光与基底物质相互作用和实现任意几何形状衬底上的光学调控至关重要,例如可

以通过超表面结构、波导、光栅等特殊光学设计改变电磁特性,包括模式约束、极化、散射特性和串扰,这些特性对于推进柔性光子器件在三维空间和非常规衬底上的应用至关重要,包括成像<sup>[159-160]</sup>、光学隐身<sup>[161-162]</sup>、光学错觉以及化学生物传感<sup>[136]</sup>等。例如, Kamali 等<sup>[160]</sup>介绍了一种基于 Si 的柔性超表面结构,这种超表面可以与非平面任意形状共形,并通过实验证明了覆盖该超表面结构的圆柱透镜能转换成非球面透镜,将光聚焦到一个点[图 9(c)]。Ni 等<sup>[161]</sup>通过实验证明了一种超薄的隐身斗篷[图 9(d)]可以紧紧包裹在物体上,使被包裹物不可见。这里通过设计超表面结构单元来提供相位补偿,重新引导光线并恢复 3D 物体的反射光。有了完整的波前和相位恢复,可以使用这种超薄柔性隐身斗篷来隐藏任何形状的物体。

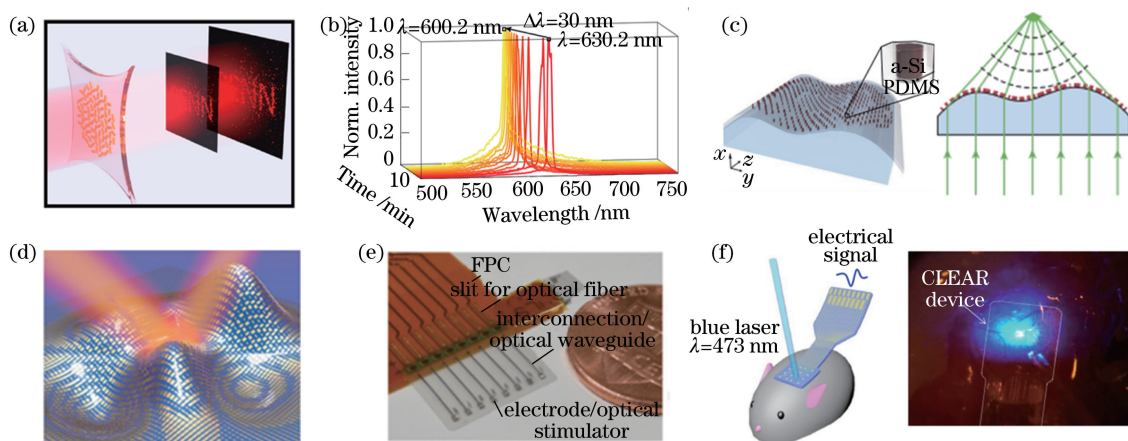


图9 柔性光子器件在新型光场调控领域的应用。(a)可拉伸超表面结构实现多个全息图片的连续可重构切换<sup>[156]</sup>；(b)可拉伸布拉格光栅实现波长可调有机半导体分布式反馈(DFB)激光器<sup>[158]</sup>；(c)与具有任意几何形状的透明物体共形的介电超表面结构示意图<sup>[160]</sup>；(d)超表面皮肤隐身衣的3D图,由一层超薄的纳米天线(金块)组成,可覆盖在任意形状的物体上<sup>[161]</sup>；(e)用聚合物基FPC封装的微尺度光源与微电极波导阵列<sup>[163]</sup>；(f)柔性光纤植入老鼠大脑皮层,用蓝光刺激神经细胞和进行皮层血管成像的装置和实验图<sup>[4]</sup>

Fig. 9 Applications of flexible photonic devices in new optical field manipulation. (a) Continuous reconfigurable switching of multiple holograms based on stretchable metasurface structure<sup>[156]</sup>; (b) flexible Bragg grating based tunable organic DFB lasers<sup>[158]</sup>; (c) schematic of dielectric metasurface layer conformed to the surface of transparent object with arbitrary geometry<sup>[160]</sup>; (d) 3D illustration of metasurface skin cloak which is composed of ultra-thin nanoscale antenna layer and can be overlaid on an object with arbitrary geometry<sup>[161]</sup>; (e) fabricated waveguide array and microelectrode packaged with polymer-based FPC<sup>[163]</sup>; (f) setup and experimental result of cortical angiography for cerebral cortex of mouse implanted with flexible fiber for delivering blue light to simulate neural cells<sup>[4]</sup>

另外,柔性光子器件的光场调控还可以用于生物光遗传学领域<sup>[4,163-166]</sup>。光遗传学结合了基因工程和光刺激来操纵神经细胞,是一种利用光来控制、调节细胞活动并同时记录产生的电学信号的过程<sup>[164]</sup>,集成微尺度光源、光纤/波电极和电极阵列芯片是目前研究人员进行光遗传学研究的有效手段。以硬材料为基础的光源、光纤/波导、探测电极会增加对大脑/生物组织的损伤,因此柔性波导、聚合物光纤阵列的应用更具适用性<sup>[5]</sup>。Yamagiwa等<sup>[163]</sup>提出了将微尺度光源与微尺度电极阵列相结合的方法,以实现高空间分辨率的光信号调控和电信号检测。与传统光学器件相比,这种薄膜电极/波导阵列具有很高的生物相容性和柔性,最大限度地减少了器件穿透引起的神经元组织损伤,并且柔性光波导可以与基于聚合物的柔性印刷电路集成[图9(e)],可用于生物组织体内(包括脊髓、大脑表层<sup>[4]</sup>)高分辨率的神经生理信号记录。电极下的局部皮层区域同时发生光激活,通过荧光显微镜和三维光学相干断层成像得到的皮层血管的活体成像如图9(f)所示。这些演示为生物医学诊断、治疗、深组织成像和外科手术提供了多种可行性方式,为柔

性光子学在生物化学传感、光遗传医疗领域的应用提供了广泛的机会。

## 6 结束语

从材料选择、光学结构几何设计、器件制备方法及应用等方面综述了柔性光子技术的发展现状。在材料选择方面,聚合物由于其固有的机械柔性长期以来一直是衬底材料的首选,但作为器件核心材料,聚合物由于本身折射率低,热膨胀系数大,在器件高密度集成和与高温工艺兼容性方面有一些限制。传统刚性无定形氧化物、功能玻璃,由于有宽透明波段窗口、高可调折射率、高热、化学稳定性、能低温沉积等特点,结合机械结构优化,在基于柔性光子器件的光通信、传感、光场调控领域展示出巨大的应用价值。其他材料,包括半导体薄膜、二维材料、一维纳米线、量子点等独特的光、电、力、磁、热等性质对于构建完整光学链路,实现柔性光子多功能集成具有重要意义。在光学几何结构设计上,创新性地提出了多中性面理论,该理论可以指导制备能承受亚毫米半径弯曲的柔性器件;结合欧拉螺旋蜿蜒弧线、局部硬化和分离结构的设计可以用于制备可拉伸光子

器件。在制备方法上,新兴的制备工艺,如转印法、单片集成、混合集成,在与柔性光子器件制备兼容性上各具特色。转移法可以有效地将功能层从刚性衬底转移到柔性衬底,使得刚性但高性能的光学材料和组件与柔性衬底的混合集成成为可能。直接在柔性衬底上将无源光子器件单片图形化则提供了一种大为简化的替代方案,具有成品率高、可大面积图形化以及与低成本卷对卷工艺兼容等优点。

虽然柔性光子技术尚处于起步阶段,但它体现出的高灵敏度、大带宽、低延迟、低功耗、不受电磁干扰等特点,让其在多功能共形传感、光互连、空间光场调控、生物光遗传等新兴领域的应用中展示出独特的优势。然而目前的研究工作大多集中在对单个柔性光子器件在光学、机械结构上的设计和器件性能表征,很少涉及以光信号产生、传感、调控、光信号探测、数据收集和分析等多功能为一体的柔性光子应用系统。未来仍需要在柔性功能性光电芯片上积累更多的理论和技术储备,争取在柔性光子材料、器件的光学机械设计,多材料多组件器件制备、系统集成上进行创新与探索。在材料和器件方面,利用新型材料独特的光、电、力、磁、热等多物理场耦合,提出全新器件结构设计,实现柔性光子器件功能性突破;在技术方面,开发新的可靠、低成本、能规模化生产器件的制备工艺和系统集成工艺;在功能化应用方面,除了实现无源器件与有源器件的高效耦合,还需要结合光、电信号不同的优势,研发可进行无线光电传输和功能应用的柔性光电适用性芯片。

### 参 考 文 献

[1] Roelkens G, Abassi A, Cardile P, et al. III-V-on-silicon photonic devices for optical communication and sensing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 3(3): 969-1004.

[2] Duan G H, Olivier S, Jany C, et al. Hybrid III-V silicon photonic integrated circuits for optical communication applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6): 379-389.

[3] Shih M H, Hsu K S, Lee K, et al. Compact tunable laser with InGaAsP photonic crystal nanorods for C-band communication [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 738-742.

[4] Park D W, Schendel A A, Mikael S, et al. Graphene-based carbon-layered electrode array

technology for neural imaging and optogenetic applications[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5258.

[5] Park S, Guo Y Y, Jia X T, et al. One-step optogenetics with multifunctional flexible polymer fibers[J]. *Nature Neuroscience*, 2017, 20(4): 612-619.

[6] Gao L, Zhang Y H, Malyarchuk V, et al. Epidermal photonic devices for quantitative imaging of temperature and thermal transport characteristics of the skin[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4938.

[7] Lu N S, Yang S X, Wang L. Stretchability, conformability, and low-cost manufacture of epidermal sensors [M] // Rogers J A, Ghaffari R, Kim D H. *Stretchable bioelectronics for medical devices and systems*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 31-51.

[8] Ye Y, Wong Z J, Lu X F, et al. Monolayer excitonic laser[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(11): 733-737.

[9] Harari G, Bandres M A, Lumer Y, et al. Topological insulator laser: theory [J]. *Science*, 2018, 359(6381): eaar4003.

[10] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator [J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.

[11] Liu A S, Jones R, Liao L, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. *Nature*, 2004, 427(6975): 615-618.

[12] Youngblood N, Chen C, Koester S J, et al. Waveguide-integrated black phosphorus photodetector with high responsivity and low dark current[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 247-252.

[13] Du S, Lu W, Ali A, et al. A broadband fluorographene photodetector [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(22): 1700463.

[14] Parameswaran C, Gupta D. Lowcost sponge based piezocapacitive sensors using a single step leavening agent mediated autolysis process [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(20): 5473-5481.

[15] Lötters J C, Olthuis W, Veltink P H, et al. The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1997, 7(3): 145-147.

- [16] Shi Z, An D C, Jiang N H, et al. Optical true-time-delay lines using polyimide-based waveguides for wideband phased-array antennas[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3952: 214-222.
- [17] Chen L, Yang H J, Qiang Z X, et al. Direct measurement of spectrally selective absorption enhancement in Fano resonance photonic crystal cavities on plastic substrates [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7609: 76090E.
- [18] Chortos A, Liu J, Bao Z N. Pursuing prosthetic electronic skin[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(9): 937-950.
- [19] Chen L Y, Tee Benjamin C K, Chortos A L, et al. Continuous wireless pressure monitoring and mapping with ultra-small passive sensors for health monitoring and critical care [ J ]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5028.
- [20] Lee J, Kwon H, Seo J, et al. Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(15): 2433-2439.
- [21] Metzger C, Fleisch E, Meyer J, et al. Flexible-foam-based capacitive sensor arrays for object detection at low cost[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(1): 013506.
- [22] Bilenberg B, Nielsen T, Clausen B, et al. PMMA to SU-8 bonding for polymer based lab-on-a-chip systems with integrated optics [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14 (6): 814-818.
- [23] Shin Y S, Cho K, Lim S H, et al. PDMS-based micro PCR chip with Parylene coating[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, 13 (5): 768-774.
- [24] Wilbur J L, Jackman R J, Whitesides G M, et al. Elastomeric optics [J]. *Chemistry of Materials*, 1996, 8(7): 1380-1385.
- [25] Choi C, Lin L, Liu Y, et al. Flexible optical waveguide film fabrications and optoelectronic devices integration for fully embedded board-level optical interconnects [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(9): 2168-2176.
- [26] Bosman E, van Steenberge G, Milenkov I, et al. Fully flexible optoelectronic foil[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16 (5): 1355-1362.
- [27] Huang Y Y, Paloczi G T, Yariv A, et al. Fabrication and replication of polymer integrated optical devices using electron-beam lithography and soft lithography [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(25): 8606-8613.
- [28] Paloczi G T, Huang Y Y, Yariv A. Free-standing all-polymer microring resonator optical filter [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(23): 1650-1651.
- [29] Kim K J, Seo J K, Oh M C. Strain induced tunable wavelength filters based on flexible polymer waveguide Bragg reflector [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1423-1430.
- [30] Clark J, Lanzani G. Organic photonics for communications [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4 (7): 438-446.
- [31] Furumi S, Fudouzi H, Miyazaki H, et al. Flexible polymer colloidal-crystal lasers with a light-emitting planar defect [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19 (16): 2067-2072.
- [32] Song H C, Oh M C, Ahn S W, et al. Flexible low-voltage electro-optic polymer modulators [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(25): 4432-4434.
- [33] Ma H, Jen A K Y, Dalton L R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14 (19): 1339-1365.
- [34] Seo J H, Zhang K, Kim M, et al. Phototransistors: flexible phototransistors based on single-crystalline silicon nanomembranes [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(1): 120-125.
- [35] Seo J H, Oh T Y, Park J, et al. A multifunction heterojunction formed between pentacene and a single-crystal silicon nanomembrane [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(27): 3398-3403.
- [36] Cho M, Seo J H, Zhao D Y, et al. Amorphous Si/SiO<sub>2</sub> distributed Bragg reflectors with transfer printed single-crystalline Si nanomembranes [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2016, 34(4): 040601.
- [37] Yoon J, Baca A J, Park S I, et al. Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs [J]. *Nature Materials*, 2008, 7: 907-915.
- [38] Kim M, Seo J H, Yu Z F, et al. Flexible germanium nanomembrane metal-semiconductor-metal photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 051105.
- [39] Qin G X, Cai T H, Yuan H, et al. Flexible radio-

- frequency single-crystal germanium switch on plastic substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(16): 163501.
- [40] Qin G X, Yuan H C, Qin Y C, et al. Fabrication and characterization of flexible microwave single-crystal germanium nanomembrane diodes on a plastic substrate[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(2): 160-162.
- [41] Yin J, Cui X R, Wang X W, et al. Flexible nanomembrane photonic-crystal cavities for tensilely strained-germanium light emission [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(24): 241107.
- [42] Yang W Q, Yang H J, Qin G X, et al. Large-area InP-based crystalline nanomembrane flexible photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(12): 121107.
- [43] Fan D J, Lee K, Forrest S R. Flexible thin-film InGaAs photodiode focal plane array [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(4): 670-676.
- [44] Zheng Z Q, Zhang T M, Yao J, et al. Flexible, transparent and ultra-broadband photodetector based on large-area WSe<sub>2</sub> film for wearable devices[J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(22): 225501.
- [45] Velusamy D B, Haque M A, Parida M R, et al. Hybrid materials: 2D organic-inorganic hybrid thin films for flexible UV-visible photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(15): 1605554.
- [46] Velusamy D B, Kim R H, Cha S, et al. Flexible transition metal dichalcogenide nanosheets for band-selective photodetection [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8063.
- [47] Zhao S, Liu X, Woo S Y, et al. An electrically injected AlGaN nanowire laser operating in the ultraviolet-C band [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(4): 043101.
- [48] Sarwar A G, Carnevale S D, Yang F, et al. Semiconductor nanowire light-emitting diodes grown on metal: a direction toward large-scale fabrication of nanowire devices [J]. *Small*, 2015, 11(40): 5402-5408.
- [49] Kumaresan V, Largeau L, Madouri A, et al. Epitaxy of GaN nanowires on graphene [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 4895-4902.
- [50] Dai X, Messanvi A, Zhang H Z, et al. Flexible light-emitting diodes based on vertical nitride nanowires[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(10): 6958-6964.
- [51] Chen G, Liang B, Liu Z, et al. High performance rigid and flexible visible-light photodetectors based on aligned X(In, Ga)P nanowire arrays[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(7): 1270-1277.
- [52] Claudon J, Bleuse J, Malik N S, et al. A highly efficient single-photon source based on a quantum dot in a photonic nanowire[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(3): 174-177.
- [53] Konstantatos G, Howard I, Fischer A, et al. Ultrasensitive solution-cast quantum dot photodetectors[J]. *Nature*, 2006, 442(7099): 180-183.
- [54] Sukhovatkin V, Hinds S, Brzozowski L, et al. Colloidal quantum-dot photodetectors exploiting multiexciton generation [J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1542-1544.
- [55] McDonald S A, Konstantatos G, Zhang S G, et al. Solution-processed PbS quantum dot infrared photodetectors and photovoltaics [J]. *Nature Materials*, 2005, 4(2): 138-142.
- [56] de Dood M J A, Polman A, Zijlstra T, et al. Amorphous silicon waveguides for microphotonics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(2): 649-653.
- [57] Harke A, Krause M, Mueller J. Low-loss singlemode amorphous silicon waveguides [J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(25): 1377-1379.
- [58] Kuyken B, Ji H, Clemmen S, et al. Nonlinear properties of and nonlinear processing in hydrogenated amorphous silicon waveguides [J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B146-B153.
- [59] Kamei T, Paegel B M, Scherer J R, et al. Integrated hydrogenated amorphous Si photodiode detector for microfluidic bioanalytical devices [J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75(20): 5300-5305.
- [60] Roeloffzen C G H, Hoekman M, Klein E J, et al. Low-loss Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> TriPleX optical waveguides: technology and applications overview [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(4): 1-21.
- [61] Sanne A, Ghosh R, Rai A, et al. Top-gated chemical vapor deposited MoS<sub>2</sub> field-effect transistors on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(6): 062101.
- [62] Furuhashi M, Fujiwara M, Ohshiro T, et al. Development of microfabricated TiO<sub>2</sub> channel waveguides [J]. *AIP Advances*, 2011, 1(3): 032102.

- [63] Liu J N, Huang Q L, Liu K K, et al. Nanoantenna-microcavity hybrids with highly cooperative plasmonic-photonic coupling [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(12): 7569-7577.
- [64] Park J, Ozdemir S K, Monifi F, et al. Titanium dioxide whispering gallery microcavities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 2(8): 711-717.
- [65] Atkins R M, Espindola R P. Method for producing photo induced grating devices by UV irradiation of heat-activated hydrogenated glass: US5930420 A [P]. 1999-07-27.
- [66] Glebov L B, Smirnov V I, Venus G. Volume bragg lasers based on high efficiency diffractive elements in photo-thermo-refractive glass: US7394842B2 [P/OL]. 2008-07-01 [2019-12-25]. <http://www.google.co.in/patents/US7394842B2>.
- [67] Glebov L B, Flecher E, Smirnov V I, et al. Stretching and compression of laser pulses by means of high efficiency volume diffractive gratings with variable periods in photo-thermo-refractive glass: US7424185B2 [P/OL]. 2008-09-09 [2019-12-25]. <http://www.google.co.in/patents/US7424185B2>.
- [68] Flemming J H, Bullington J A. Multi-layer photo definable glass with integrated devices: US16/072828[P/OL]. 2019-06-13 [2019-12-25]. <http://www.google.co.in/patents/US16/072828>.
- [69] Di X X, Hu Z M, Jiang J T, et al. Use of long-term stable CsPbBr<sub>3</sub> perovskite quantum dots in phosphosilicate glass for highly efficient white LEDs [J]. *Chemical Communications*, 2017, 53(80): 11068-11071.
- [70] Sandland J G. Sputtered silicon oxynitride for microphotonics: a materials study [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [71] Kim J, Winick K A, Florea C, et al. Design and fabrication of low-loss hydrogenated amorphous silicon overlay DBR for glass waveguide devices[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(6): 1307-1315.
- [72] Fan L, Varghese L T, Xuan Y, et al. Direct fabrication of silicon photonic devices on a flexible platform and its application for strain sensing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20564-20575.
- [73] Rangarajan B, Kovalgin A Y, Wörhoff K, et al. Low-temperature deposition of high-quality silicon oxynitride films for CMOS-integrated optics [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 941-943.
- [74] Li L, Lin H T, Qiao S T, et al. Monolithically integrated stretchable photonics [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(2): 17138.
- [75] Kim M, Seo J H, Yu Z F, et al. Flexible germanium nanomembrane metal-semiconductor-metal photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 051105.
- [76] Hsueh C H. Modeling of elastic deformation of multilayers due to residual stresses and external bending[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(12): 9652-9656.
- [77] Kaltenbrunner M, Sekitani T, Reeder J, et al. An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics[J]. *Nature*, 2013, 499(7459): 458-463.
- [78] Kim D H, Ahn J H, Choi W M, et al. Stretchable and foldable silicon integrated circuits[J]. *Science*, 2008, 320(5875): 507-511.
- [79] Sekitani T, Zschieschang U, Klauk H, et al. Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(12): 1015-1022.
- [80] Yuan H C, Ma Z Q, Roberts M M, et al. High-speed strained-single-crystal-silicon thin-film transistors on flexible polymers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(1): 013708.
- [81] Seo J H, Chang T H, Lee J, et al. Microwave flexible transistors on cellulose nanofibrillated fiber substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(26): 262101.
- [82] Yang W Q, Yang H J, Qin G X, et al. Large-area InP-based crystalline nanomembrane flexible photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(12): 121107.
- [83] Chen Y, Li H, Li M. Flexible and tunable silicon photonic circuits on plastic substrates[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 622.
- [84] Li L, Lin H T, Qiao S T, et al. Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 643-649.
- [85] Hu J J, Li L, Lin H T, et al. Flexible integrated photonics: where materials, mechanics and optics meet [Invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9): 1313-1331.
- [86] Sun J Y, Lu N S, Yoon J, et al. Inorganic islands on a highly stretchable polyimide substrate [J]. *Journal of Materials Research*, 2009, 24(11): 3338-3342.
- [87] Li L, Zhang P, Wang W M, et al. Foldable and



- cytocompatible Sol-gel TiO<sub>2</sub> photonics[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13832.
- [88] Li L, Lin H T, Huang Y Z, et al. High-performance flexible waveguide-integrated photodetectors[J]. *Optica*, 2018, 5(1): 44-51.
- [89] Harrison C, Stafford C M, Zhang W, et al. Sinusoidal phase grating created by a tunably buckled surface[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(18): 4016-4018.
- [90] Yu C J, O'Brien K, Zhang Y H, et al. Tunable optical gratings based on buckled nanoscale thin films on transparent elastomeric substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(4): 041111.
- [91] Lee S, Kim S, Kim T T, et al. Reversibly stretchable and tunable terahertz metamaterials with wrinkled layouts[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(26): 3491-3497.
- [92] Amjadi M, Pichitpajongkit A, Lee S, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(5): 5154-5163.
- [93] Yamada T, Hayamizu Y, Yamamoto Y, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(5): 296-301.
- [94] Kim D H, Lu N S, Ghaffari R, et al. Materials for multifunctional balloon catheters with capabilities in cardiac electrophysiological mapping and ablation therapy[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(4): 316-323.
- [95] Verplancke R, Bossuyt F, Cuypers D, et al. Thin-film stretchable electronics technology based on meandering interconnections: fabrication and mechanical performance [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(1): 015002.
- [96] Li L, Lin H T, Michon J, et al. A new twist on glass: a brittle material enabling flexible integrated photonics[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2017, 8(1): 61-68.
- [97] Aksu S, Huang M, Artar A, et al. Flexible plasmonics on unconventional and nonplanar substrates[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(38): 4422-4430.
- [98] Ryabchun A, Wegener M, Gritsai Y, et al. Novel effective approach for the fabrication of PDMS-based elastic volume gratings [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(1): 169-176.
- [99] Ghisleri C, Potenza M A C, Ravagnan L, et al. A simple scanning spectrometer based on a stretchable elastomeric reflective grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(6): 061910.
- [100] Yin K, Lee Y H, He Z Q, et al. Stretchable, flexible, rollable, and adherable polarization volume grating film [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5814-5823.
- [101] Khodasevych I E, Shah C M, Sriram S, et al. Elastomeric silicone substrates for terahertz fishnet metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(6): 061101.
- [102] Shalaev V M, Cai W S, Chettiar U K, et al. Negative index of refraction in optical metamaterials [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3356-3358.
- [103] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(9): 523-530.
- [104] Walia S, Shah C M, Gutruf P, et al. Flexible metasurfaces and metamaterials: a review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(1): 011303.
- [105] Xu X C, Subbaraman H, Hosseini A, et al. Stamp printing of silicon-nanomembrane-based photonic devices onto flexible substrates with a suspended configuration [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1020-1022.
- [106] Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, et al. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp [J]. *Nature Materials*, 2006, 5(1): 33-38.
- [107] Zablocki M J, Sharkawy A, Ebil O, et al. Nanomembrane transfer process for intricate photonic device applications [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(1): 58-60.
- [108] Zhou W D, Ma Z Q, Chuwongin S, et al. Semiconductor nanomembranes for integrated silicon photonics and flexible Photonics [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2012, 44(12/13): 605-611.
- [109] Chanda D, Shigeta K, Gupta S, et al. Large-area flexible 3D optical negative index metamaterial formed by nanotransfer printing [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(7): 402-407.
- [110] Hines D R, Ballarotto V W, Williams E D, et al. Transfer printing methods for the fabrication of flexible organic electronics [J]. *Journal of Applied*

- Physics, 2007, 101(2): 024503.
- [111] Lin H T, Li L, Zou Y, et al. Chalcogenide glass planar photonics: from mid-IR sensing to 3-D flexible substrate integration [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8600: 86000K.
- [112] Zou Y, Zhang D N, Lin H T, et al. High-performance, high-index-contrast chalcogenide glass photonics on silicon and unconventional non-planar substrates[J]. Advanced Optical Materials, 2014, 2(5): 478-486.
- [113] Koyama F, Liou K Y, Dentai A G, et al. Multiple-quantum-well GaInAs/GaInAsP tapered broad-area amplifiers with monolithically integrated waveguide lens for high-power applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(8): 916-919.
- [114] Ahn D, Hong C Y, Liu J F, et al. High performance, waveguide integrated Ge photodetectors[J]. Optics Express, 2007, 15(7): 3916-3921.
- [115] Suzuki K, Takiguchi K, Hotate K. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(1): 66-72.
- [116] Mahameed R, Sinha N, Pisani M B, et al. Dual-beam actuation of piezoelectric AlN RF MEMS switches monolithically integrated with AlN contour-mode resonators [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(10): 105011.
- [117] Karagodsky V, Pesala B, Chase C, et al. Monolithically integrated multi-wavelength VCSEL arrays using high-contrast gratings [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 694-699.
- [118] Lee S J, Ku Z, Barve A, et al. A monolithically integrated plasmonic infrared quantum dot camera [J]. Nature Communications, 2011, 2: 286.
- [119] Samusjew A, Kratzer M, Moser A, et al. Inkjet printing of soft, stretchable optical waveguides through the photopolymerization of high-profile linear patterns [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(5): 4941-4947.
- [120] Heck M J R, Bauters J F, Davenport M L, et al. Hybrid silicon photonic integrated circuit technology [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 6100117.
- [121] Roelkens G, Brouckaert J, van Thourhout D, et al. Adhesive bonding of InP/InGaAsP dies to processed silicon-on-insulator wafers using DVS-bis-benzocyclobutene[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(12): G1015-G1019.
- [122] Yun S, Park S, Park B, et al. Polymer-waveguide-based flexible tactile sensor array for dynamic response[J]. Advanced Materials, 2014, 26(26): 4474-4480.
- [123] Zhao H C, O' Brien K, Li S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides [J]. Science Robotics, 2016, 1(1): eaai7529.
- [124] Ramuz M, Tee B C, Tok J B, et al. Transparent, optical, pressure-sensitive artificial skin for large-area stretchable electronics [J]. Advanced Materials, 2012, 24(24): 3223-3227.
- [125] Missinne J, Benítez N T, Chiesura G, et al. Flexible thin polymer waveguide Bragg grating sensor foils for strain sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10101: 101010X.
- [126] Karrock T, Gerken M. Pressure sensor based on flexible photonic crystal membrane[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(12): 4901-4911.
- [127] Harnett C K, Zhao H C, Shepherd R F. Stretchable optical fibers: threads for strain-sensitive textiles [J]. Advanced Materials Technologies, 2017, 2(9): 1700087.
- [128] To C, Hellebrekers T L, Park Y L. Highly stretchable optical sensors for pressure, strain, and curvature measurement [C] // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 28-October 2, 2015. Hamburg, Germany. IEEE, 2015: 5898-5903.
- [129] Guerrero R A, Barretto J T, Uy J L V, et al. Effects of spontaneous surface buckling on the diffraction performance of an Au-coated elastomeric grating[J]. Optics Communications, 2007, 270(1): 1-7.
- [130] Zhang L, Pan J, Zhang Z, et al. Ultrasensitive hybrid optical skin[EB/OL]. [2020-01-25]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.03808.pdf>.
- [131] Xu L Z, Gutbrod S R, Bonifas A P, et al. 3D multifunctional integumentary membranes for spatiotemporal cardiac measurements and stimulation across the entire epicardium[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3329.
- [132] Kalathimekkad S, Missinne J, Schaubroeck D, et al. Alcohol vapor sensor based on fluorescent dye-doped optical waveguides [J]. IEEE Sensors

- Journal, 2015, 15(1): 76-81.
- [133] Applegate M B, Perotto G, Kaplan D L, et al. Biocompatible silk step-index optical waveguides [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6 (11): 4221-4227.
- [134] Kujala S, Mannila A, Karvonen L, et al. Natural silk as a photonics component: a study on its light guiding and nonlinear optical properties [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22358.
- [135] Bai W B, Yang H J, Ma Y J, et al. Optical waveguides: flexible transient optical waveguides and surface-wave biosensors constructed from monocrystalline silicon [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(32): 1870239.
- [136] Liu X J, Wang J J, Tang L H, et al. Flexible plasmonic metasurfaces with user-designed patterns for molecular sensing and cryptography [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26 (30): 5515-5523.
- [137] Chen Y, Lin H T, Hu J J, et al. Heterogeneously integrated silicon photonics for the mid-infrared and spectroscopic sensing[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(7): 6955-6961.
- [138] Jin T N, Lin H Y G, Tiwald T, et al. Flexible mid-infrared photonic circuits for real-time and label-free hydroxyl compound detection [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 4153.
- [139] Li M J, Hoover B, Nazarov V N, et al. Multicore fiber for optical interconnect applications[C]//2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference, July 2-6, 2012. Busan, Korea (South). IEEE, 2012: 564-565.
- [140] van Steenberge G, Geerinck P, van Put S, et al. MT-compatible laser-ablated interconnections for optical printed circuit boards [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(9): 2083-2090.
- [141] Bona G L, Offrein B J, Bapst U, et al. Characterization of parallel optical-interconnect waveguides integrated on a printed circuit board[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5453: 134-141.
- [142] Krishnamoorthy A V, Ho R, Zheng X Z, et al. Computer systems based on silicon photonic interconnects[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(7): 1337-1361.
- [143] Batten C, Joshi A, Orcutt J, et al. Building manycore processor-to-DRAM networks with monolithic CMOS silicon photonics [J]. *IEEE Micro*, 2009, 29(4): 8-21.
- [144] Chen R T, Lin L, Choi C, et al. Fully embedded board-level guided-wave optoelectronic interconnects [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(6): 780-793.
- [145] Gu T, Nair R, Haney M W. Prismatic coupling structure for intrachip global communication [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45 (4): 388-395.
- [146] Missinne J, Kalathimekkad S, van Hoe B, et al. Stretchable optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4168-4179.
- [147] Doany F E, Schow C L, Kash J A, et al. Waveguide-coupled parallel optical transceiver technology for Tb/s-class chip-to-chip data transmission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6899: 68990V.
- [148] Kromer C, Sialm G, Berger C, et al. A 100-mW 4/spl times/10 Gb/s transceiver in 80-nm CMOS for high-density optical interconnects[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, 40(12): 2667-2679.
- [149] Li L, Zou Y, Lin H T, et al. A fully-integrated flexible photonic platform for chip-to-chip optical interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 4080-4086.
- [150] de Wilde M. Chip-to-chip parallel optical interconnects over optical backpanels based on arrays of multimode waveguides [C] // *Proceedings of the 9th Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter*, 2004: 61-64.
- [151] Bosman E, van Steenberge G, van Hoe B, et al. Highly reliable flexible active optical links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(5): 287-289.
- [152] Hsu K S, Chiu T T, Lee P T, et al. Wavelength tuning by bending a flexible photonic crystal laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31 (12): 1960-1964.
- [153] Yu C L, Kim H, de Leon N, et al. Stretchable photonic crystal cavity with wide frequency tunability[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(1): 248-252.
- [154] Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.
- [155] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1002-1008.

- [156] Malek S C, Ee H S, Agarwal R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3641-3645.
- [157] Yin K, Lee Y H, He Z Q, et al. Stretchable, flexible, and adherable polarization volume grating film for waveguide-based augmented reality displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(4): 232-237.
- [158] Schauer S, Liu X, Worgull M, et al. Shape-memory polymers as flexible resonator substrates for continuously tunable organic DFB lasers [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(3): 576-584.
- [159] Jiang Z H, Kang L, Werner D H. Conformal metasurface-coated dielectric waveguides for highly confined broadband optical activity with simultaneous low-visibility and reduced crosstalk [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 356.
- [160] Kamali S M, Arbabi A, Arbabi E, et al. Decoupling optical function and geometrical form using conformal flexible dielectric metasurfaces [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11618.
- [161] Ni X, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light [J]. *Science*, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [162] Cheng J R, Jafar-Zanjani S, Mosallaei H. All-dielectric ultrathin conformal metasurfaces: lensing and cloaking applications at 532 nm wavelength [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38440.
- [163] Yamagiwa S, Ishida M, Kawano T. Flexible parylene-film optical waveguide arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(8): 083502.
- [164] Deisseroth K. Optogenetics [J]. *Nature Methods*, 2011, 8(1): 26-29.
- [165] Park S, Loke G, Fink Y, et al. Flexible fiber-based optoelectronics for neural interfaces [J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(6): 1826-1852.
- [166] Lu C, Park S, Richner T J, et al. Flexible and stretchable nanowire-coated fibers for optoelectronic probing of spinal cord circuits [J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1600955.