

# 微流体光波导器件研究进展

李儒健 唐雄贵 廖进昆 郭海博 尹根

电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

**摘要** 微流体光波导器件是一种基于微流体调控的新型光学功能器件,在生物医学和环境监测等领域中具有广阔的应用前景。介绍了微流体光波导器件的基本结构,分析了微流体光波导器件的工作原理,阐述了微流体光波导器件的研究现状,并指出了其发展趋势。

**关键词** 光学器件;微流体;光开关;微流控分布式反馈染料激光器;可调光功率分束器;可调光衰减器

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.010004

## Recent Development in Microfluidic Optical Waveguide Devices

Li Rujian Tang Xiongwei Liao Jinkun Guo Haibo Yin Gen

*School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China,  
Chengdu, Sichuan 610054, China*

**Abstract** Microfluidic optical waveguide devices are novel optical components based on turning microfluidic, which have wide potential applications in biomedical and environment monitoring and so on. We describe the element structures and present the operation principles of microfluidic optical waveguide devices. The recent developments in the area of the microfluidic waveguide devices are reviewed, and the research tendency in near future is predicted.

**Key words** optical devices; microfluidics; optical switch; optofluidic distributed feedback dye laser; variable optical power splitter; variable optical attenuator

**OCIS codes** 230.3990; 230.4000; 230.7370

## 1 引言

近年来,微流体光波导器件已引起人们的广泛关注与重视,这种新型结构的光学器件在生物传感、化学分析和环境监测等方面有着广泛的潜在应用<sup>[1]</sup>。微流体光波导器件具体结构形式多样,根据芯层和包层界面的不同,可将微流体光波导器件分为两类:1)基于固-液界面的微流体光波导器件;2)基于液-液(L<sup>2</sup>)界面的全流体光波导器件。基于固-液界面的微流体器件通常采用有机聚合物来设计、制作微流体通道,调控所注入流体,使其在微通道内流动,流体和有机聚合物分别作为波导器件的芯层或包层<sup>[2-3]</sup>。而对于液-液界面的全流体光波导器件,是将两种不同折射率的液体分别通入微管道,由于液体的层流特性,通入的两种液体分别作为波导的芯层和包层,通过控制液体的流速或折射率,达到对波导内传输光的调控。微流体光波导器件的具体制造技术多种多样,具体包括传统光刻、软刻蚀技术、纳米压印和飞秒激光三维微加工技术<sup>[4-5]</sup>等,这些微细加工技术的进步与发展有力地推动了微流体光波导器件的研究。目前,人们提出了多种微流体光波导器件的实现方案,如光开关、光波长调制器<sup>[6]</sup>、可调光功率分束器<sup>[7]</sup>、可调光衰减器<sup>[8]</sup>和微流控分布式反馈(DFB)染料激光器<sup>[9]</sup>等。本文介绍了微流体光波导器件的基本结构和工作原理,阐述了其研究现状,最后对其发展趋势进行了探讨。

收稿日期: 2013-09-11; 收到修回稿日期: 2013-10-28; 网络出版日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(60908024)、中央高校基本科研业务费(ZYGX2011J050)

作者简介: 李儒健(1989—),男,硕士研究生,主要从事微流体元器件方面的研究。E-mail: lirujian.fly@163.com

导师简介: 唐雄贵(1974—),男,博士,副教授,主要从事微光学、集成光学等方面的研究。E-mail: tangxg@uestc.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 2 微液体光波导结构和原理

### 2.1 固-液界面的微流体光波导结构和原理

固-液界面的微流体光波导的常见结构如图1所示,用固体制作一个微流体通道,作为波导的包层,通道内通入高折射率的液体作为波导的芯层。这样的波导结构与光纤传光原理类似,其芯层折射率大于包层折射率。光波在两种介质界面处发生反射,当入射角大于对应临界角时发生全反射,光波在高折射率介质内传输。基于这种界面的微流体光波导器件已实现多种具体结构。



图1 固-液界面微流体光波导结构

Fig.1 Schematic for microfluidic waveguide of the solid-liquid interfaces

### 2.2 液-液界面微流体光波导结构和原理

液-液界面微流体光波导常见结构如图2所示,它包括微通道、三个流体入口、一个流体出口、光输入端口、光输出端口等部分。包层液体和芯层液体分别通过对应的流体入口注入,其芯层液体折射率高于包层折射率。最常用的液体包括去离子水、离子盐溶液、有机溶液以及液晶等<sup>[10-11]</sup>。液体在流动过程中自然形成动态液-液界面的波导<sup>[12]</sup>。这样的动态液-液界面微流体光波导器件具有如下优点:1)通过调节流体的流速和折射率,容易实现  $L^2$  器件及其相应光学功能;2)传统固体型光学元件通常需要抛光或高精度的微细加工,而  $L^2$  器件在层流调节下通常具有非常平滑的界面,这是此类微流体系统一个显著的光学特点<sup>[13]</sup>;3)可以非常直接地通过不同折射率流体之间的扩散来获得梯度的折射率轮廓分布;4)由于  $L^2$  器件本身就在微流体通道内部形成,所以可以很容易地在相同的微流体平台上与其他微流体部件实现如样品准备、试剂测试及样品分离等集成。

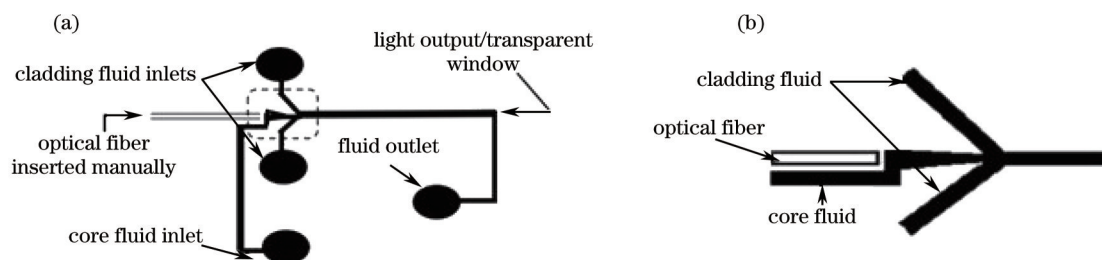


图2 液-液微流体光波导结构。(a)整体结构;(b)局部放大图

Fig.2 Schematic for microfluidic waveguide of liquid-liquid interfaces. (a) Diagram of overall structure; (b) detailed diagram of the regions of the channel in (a) highlighted by dashed box

多个支流通道连接到一个主流体通道内,光信号可以通过微透镜聚焦后耦合到微流体通道内,也可使用锥形光纤将外部光源耦合后对准并插入到微流体器件内,从而使得光源、检测器以及微流体通道形成一个有机整体,实现其相应功能。

当微管道的尺寸在微米甚至纳米量级时,其中流体雷诺数<sup>[14]</sup>在0.001~1之间,远小于紊流临界雷诺数,表现为流体运动方程中的黏滞力占主导地位,使得微纳米尺度的微管道中流体具有明显的层流特性,两种或多种不同流体在通道中能够保持自身流型不变,只在流体接触面上发生反应或分子扩散现象。这种微流体层流现象具有较高的稳定性。通过改变微流体管道中芯层和包层的相对宽度或折射率分布,便可调控光波导的光学特性,如模场分布、吸收损耗、辐射损耗等,从而实现可调控的光学功能。

## 3 研究现状

近年来,微流体光子学发展迅速,所报道的器件具体结构形式多样,根据不同的功能,分别对上述两种分类所包含的典型器件进行介绍。

### 3.1 固-液界面微流体波导器件

固-液界面的微流体光波导器件已经报道了多种,包括光探测器、可调光衰减器、微流体光子器件和微流控DFB染料激光器等,下面分别对几类器件进行介绍。

2008年, Wu等<sup>[15]</sup>提出了一种在聚二甲基硅氧烷(PDMS)微通道表面涂覆无定型聚四氟乙烯(Teflon AF)薄膜的固-液界面微流体通道探测器。它的具体结构如图3所示。通过光刻技术,在硅晶片上制作出一个600 μm宽、6 cm长的液体通道。该通道以PDMS材料作为外包层,沟道表面涂覆Teflon AF薄膜,微通道内通入高折射率的液体形成波导。入射光通过耦合进入波导发生全反射,在光输出端口安置了CCD光谱仪。该装置测得的吸收率与商用光谱仪测得的结果很相近。这项创新的技术提供了一种成本低、效率高的方法,填补了原位和实验室分析之间的技术差距。

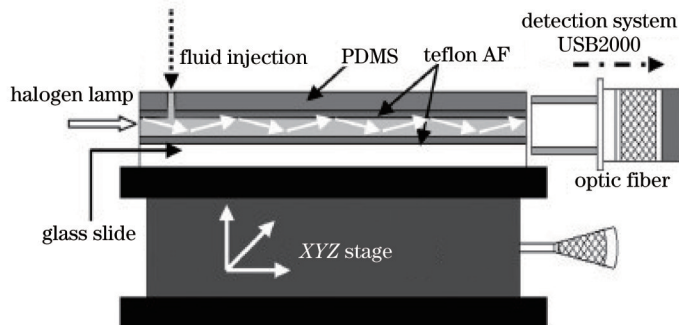


图3 基于Teflon AF薄膜的光探测器实验设备

Fig.3 Schematic of the experimental setup of optical sensor based on Teflon AF film

可调光衰减器是固-液型微流体光波导器件中最为常见的一类光子器件。2005年, Zhu等<sup>[16]</sup>提出一种固-液型微流体波导可调光衰减器,其结构如图4所示。其上包层的部分区域作为微流体通道,通过改变流体折射率来调控导波光束的约束能力,从而实现光衰减。采用软光刻制造出PDMS微流体通道,将不同折射率的溶液通入微流体通道,可以调节光波导的输出。当包层开口中的液体与波导芯层的折射率相等时,光波导的输出光功率最大;而当微流体包层开口中的液体折射率高于芯层波导折射率时,输出的光功率将会减小,从而实现了输出光强的衰减。该器件虽然结构简单、易于集成,但存在调控范围较小、对波长和偏振的依赖性较大的缺点。

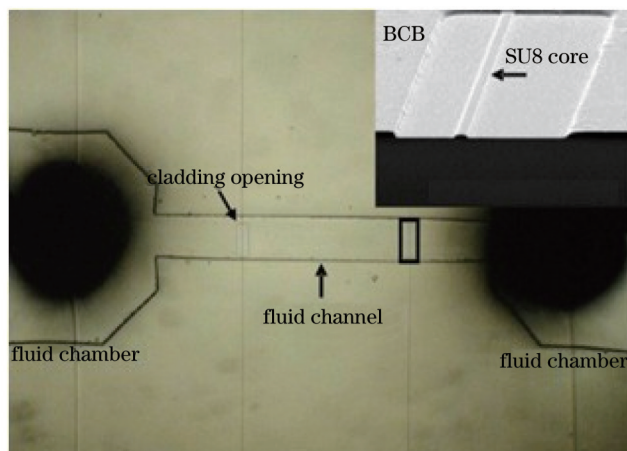


图4 可调光衰减器结构图及其局部放大图

Fig.4 Schematic structure of variable optofluidic attenuator and detailed diagram of the regions of the channel highlighted by rectangle

2008年, Yu等<sup>[17]</sup>采用压力驱动来改变光束传播区液体的厚度,改变液体对光的吸收以实现光衰减的调控,但是该方案衰减精度低,且难以实现结构紧凑、易于集成、易于调控的光衰减器。

2009年, Lapsely等<sup>[18]</sup>利用液体与固体界面处的光反射和透射特性,通过改变液体折射率,使其光束在分界面处的反射变化,从而实现衰减调控。但该器件存在一定的波长与偏振依赖性,且有稳定性较差、光路

装调困难、光损耗高等缺点,不能用于集成微流体光子系统中。

针对以上光衰减器的不足,2013年,本课题组基于固-液界面的波导,提出了一种新型结构的可调微流体光衰减器<sup>[19]</sup>。这种可调光衰减器利用全内反射原理来实现导波中传输光强的控制。它的结构如图5(a)所示,图5(b)和(c)分别表示在位置 $A_1A_2$ 和 $B_1B_2$ 处的波导横截面。图中蓝色区域表示微流体通道,通过微流泵将两种不同液体注入 $Q_1$ 和 $Q_2$ ,两种液体在微通道中向前流动并相互扩散,混合液体在 $Q_3$ 处流出。光信号通过锥形光纤耦合进光波导,在光波导内向前传播,当达到波导与流体分界面时将发生反射和透射,从而实现波导内光功率的衰减。其衰减量与微通道内混合液体的折射率密切相关,通过改变混合液体的折射率即可实现对光衰减的调控。这种可调光衰减器的衰减范围大,偏振依赖性小,具有很好的应用前景。

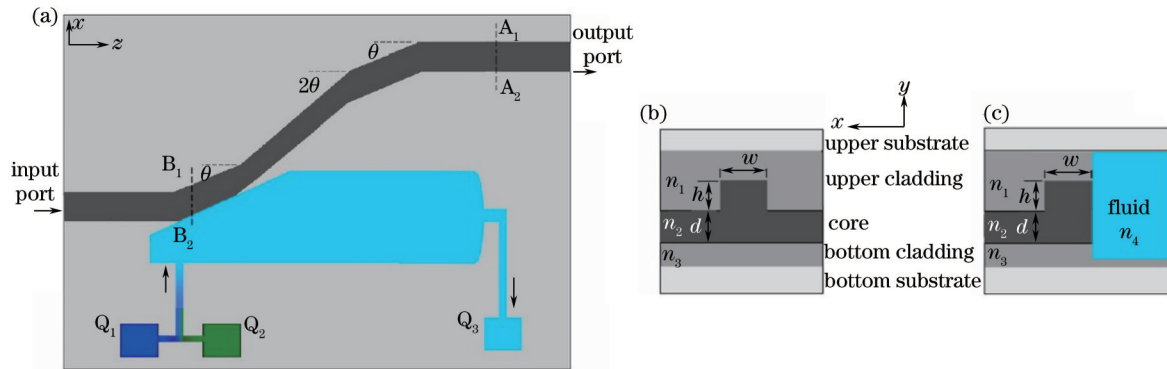


图5 (a)微流控波导型可调光衰减器原理结构图; (b)位置 $A_1A_2$ 处波导横截面图; (c)位置 $B_1B_2$ 处波导横截面图

Fig.5 Schematic structure of variable optofluidic attenuator. (a) Top view; (b), (c) cross-section views of waveguide at the positions  $A_1A_2$  and  $B_1B_2$ , respectively

微流体光子晶体波导是微流控光子学的重要组成部分,关于微流体光子晶体波导的研究也逐渐成为热门。2007年, Erickson 等<sup>[20]</sup>通过软光刻技术,制造出一个动态的基于液体折射率来调控自身特性的微流体光子晶体波导器件。在纳米光子层中,有一个微纳流体输入结构和一个微流体控制源。其光子晶体结构如图6所示。这项技术可以实现光子器件的动态调整。

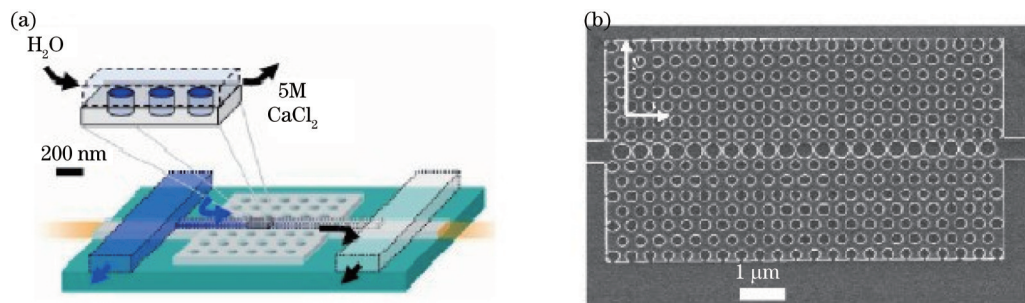


图6 (a)微流控光子器件结构图; (b)光子晶体结构

Fig.6 (a) Schematic of microfluidic photonic device; (b) silicon-on-insulator photonic crystal

微流控DFB染料激光器是一种新型结构的有源器件。2005年,丹麦工业大学(DTU)的 Nilsson 等<sup>[21]</sup>提出并研究了一种微流控激光器实现方法,其基本结构和原理如图7所示。该激光器以环烃共聚物(COC)为芯片材料,芯片内部的微流体通道、谐振腔和光波导等微结构采用纳米热压印技术一次成型。流体通道的中部有23条平行沟槽形成分布式反馈谐振腔,垂直于沟槽方向压印有平面波导带,以引导激光输出。工作时保持染料溶液在微流体通道内流动,从顶部入射532 nm波长抽运光,激光沿芯片平面从波导输出。该激光器的主峰波长在577 nm,激光阈值为 $65 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 。

2006年, Psaltis 等<sup>[22]</sup>研制出一种可调分布式反馈性PDMS芯片染料激光器,其结构如图8(a)所示。该器件在PDMS硅橡胶芯片上制作截面尺寸为 $5 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的微流体通道,在通道中注入较高折射率的罗丹明6G染料溶液,形成固-液界面的单模光波导。在微流体通道中有长度4 mm周期排列的PDMS小柱,其DFB光栅结构如图8(b)所示。在532 nm Nd:YAG脉冲抽运下,从光栅一端可得到单模激光输出,激光器的

输入-输出特性如图8(c)所示。通过改变染料组分和机械形变等方法,这种染料激光器的输出波长可以在60 nm的范围内调节[图8(d)]。

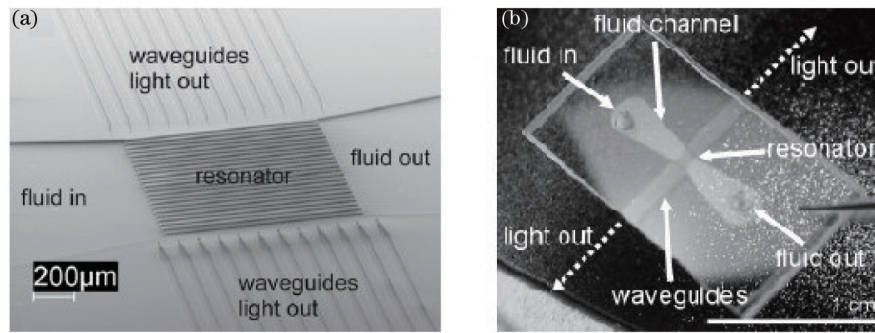


图7 (a)聚合物压印结构的扫描电子显微镜(SEM)照片;(b) DTU微流控激光器原型照片

Fig.7 (a) SEM image of the imprinted polymer device; (b) photograph of the optofluidic DFB dye laser

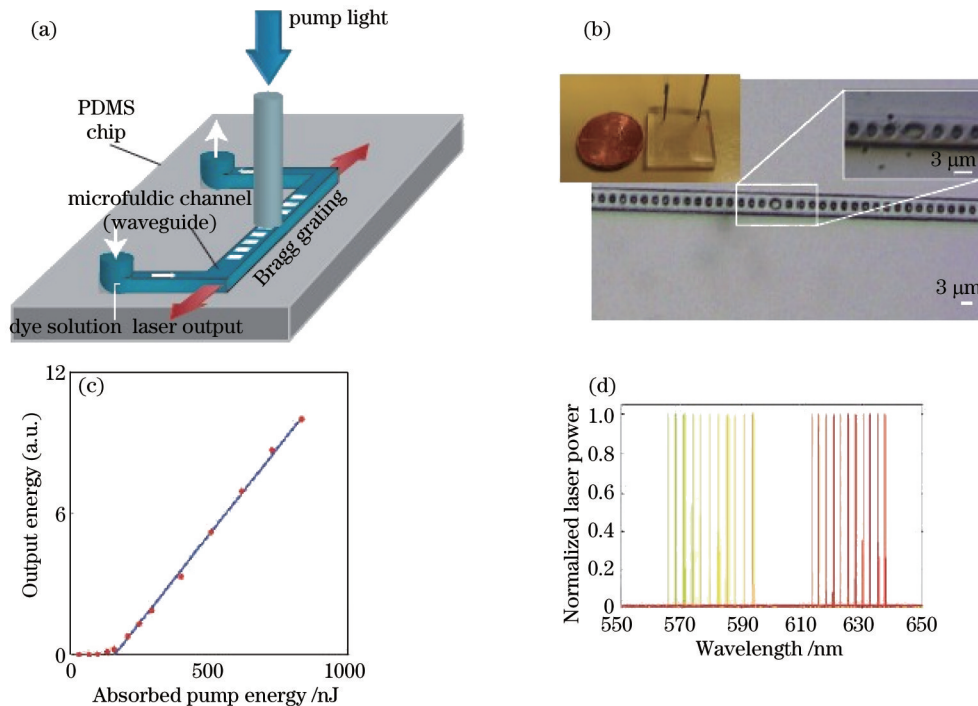


图8 微流控DFB染料激光器

Fig.8 Optofluidic DFB dye laser

### 3.2 液-液界面的微流体光波导器件

液-液界面的光波导器件的种类繁多,典型器件包括光开关、光功率分束器等。2004年,Wolfe等<sup>[23]</sup>设计了一种微流体光波导光开关,其结构如图8(a)所示,这种基于液-液界面的微流体光开关有三条光输出通道。在包层之外还增加了上下两个流体芯层控制层,控制层流体的流速变化会使波导的芯层发生改变。当上层控制层速度小于下层控制层速度时,波导芯层路线如图8(b)所示,光从波导上支路输出[图8(e)];当上下控制层速度相等时,波导芯层路线如图8(c)所示,光从中间支路输出[图8(f)];当上层控制层流速大于下层控制层时,波导芯层路线如图8(d)所示,光从下支路输出[图8(g)]。该设计实现了光开关的基本功能,这种器件的最大缺点是开关时间较慢,光从一个支路切换到另一个支路的时间大约需要2 s。

基于液-液界面的另一类微流体光波导器件是可调光功率分束器。微流控光子系统对可调光功率分束器有着广阔的市场需求,基于此,人们开展了微流体光波导可调光功率分束器研究。

BWolfe等<sup>[7]</sup>在2005年提出并研究了一种微流体可调光功率分束器。如图10所示,该波导的芯层与包层由两种具有不同折射率的液体构成,在流体输入端,两波导互相平行。在流体的流动过程中,由于液体的扩散

作用,两波导逐渐融合成一条波导。当流体在低速时,波导的芯层和包层可以获得相等强度的光输入;而在高速时,波导的芯层和包层获得不同的光强输入。光束从流体的输出端口处输入,其传播方向与流体流动方向相反,通过在芯层中注入不同浓度的染料来改变对光的吸收,从而实现分束器光功率输出的调控。

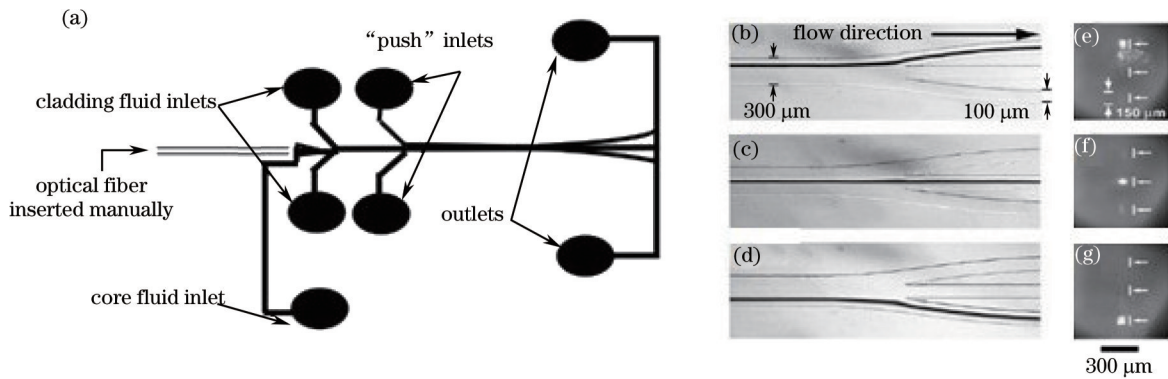


图9 (a)光开关示意图; (b)~(d)为微流体通道的顶视图; (e)~(g)为光通道末端的输出光斑

Fig.9 (a) Schematic diagram of the microchannel used for the optical switch; (b)~(d) optical micrograph of the top view of the microfluidic channels; (e)~(g) optical micrograph of the light that exits the liquid/liquid waveguides at the end of the channel system

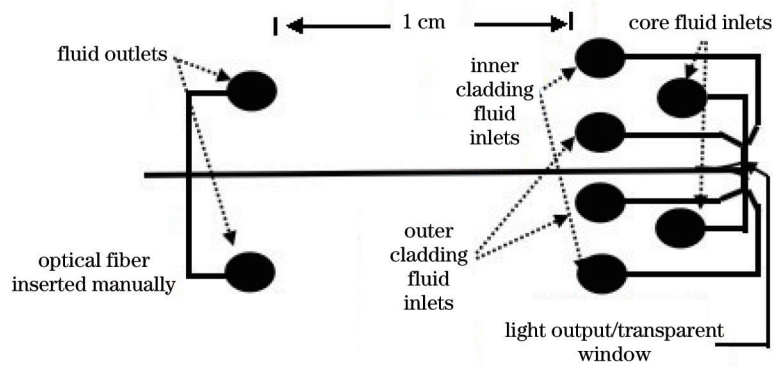


图10 可调光功率分束器

Fig.10 Schematic of variable optofluidic splitter

2007年,Nguyen等<sup>[8]</sup>提出了一种类似的光流体可调光功率分束器实现方法,其可调分束功能也是通过控制不同流体的流动速度来实现的。图11(a)是液-液波导模型,图11(b)是液体包层速度和芯层速度的比值分布,当左右包层的速度相等时,可以实现等光强分光。这些微流控可调功率分束器初步实现了光功率输出的调控。其入射光通过光纤耦合进入微流体波导,耦合难度较大,全反射角为 $71.4^\circ$ ,这就要求分支角小于 $18.6^\circ$ 才能完全将光引入各支路。由于该分束器存在光损耗大、调控精度差、调控范围小、调控难度大、受环境干扰影响大等诸多缺点,因此,在实际应用中受到很大限制。

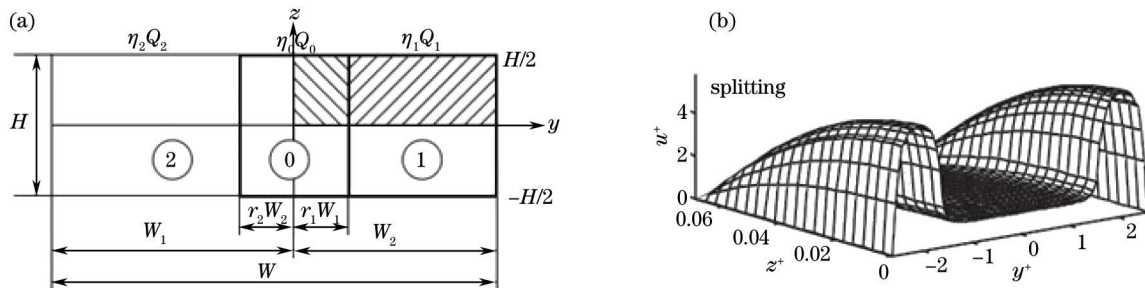


图11 (a) 液/液波导模型; (b) 液体速度分布

Fig.11 (a) Model of a liquid-core/liquid-cladding waveguide; (b) dimensionless velocity distributions

近年来,微流体光波导器件已经引起了国内外研究人员的关注和重视,开展了一些有意义的研究工作。目前国内有关微流体光波导的报道还比较少,已有一些研究单位(如清华大学、南京邮电大学)开始关注和参与相关微流体可控光子器件的研究<sup>[24-25]</sup>,但是,与国外相比还存在一定差距。

## 4 结束语

微流体光波导器件是一种具有广阔的应用前景的新型光学器件。人们在这方面已经开展了较多的研究,且发展十分迅速,但这些仍是基础性的初步研究,离实际应用还存在一定的距离,因而,其研究仍将是微流体光子学领域的研究重点和热点,今后将主要侧重以下几个方面:1)探索新的结构,实现新的功能,进一步提高器件性能,如提高光开关的响应速度、增大光衰减器的调控范围;2)选择更合适的材料、探索更有效的制作技术与方法来降低器件成本;3)实现不同微流体光波导器件的多功能集成,并探索其在生物光子学、化学分析、环境监测等领域中的具体应用。

## 参考文献

- 1 Pang L, Chen H M, Freeman L M, *et al.* Optofluidic devices and applications in photonics, sensing and imaging [J]. Lab Chip, 2012, 12(19): 3543-3551.
- 2 Datta A, Eom I, Dhar A, *et al.* Microfabrication and characterization of Teflon AF-coated liquid core waveguide channels in silicon [J]. IEEE Sens J, 2003, 3(6): 788-795.
- 3 C Monat, P Domachuk, B J Eggleton. Integrated optofluidics: a new river of light [J]. Naure Photon, 2007, 1(2): 106-114.
- 4 Haiyi Sun, Fei He, Zenghui Zhou, *et al.* Fabrication of microfluidic optical waveguides on glass chips with femtosecond laser pluses [J]. Opt Lett, 2007, 32(11): 1536-1538.
- 5 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 595-622.  
何飞,程亚.飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J].中国激光,2007,34(5):595-622.
- 6 S E Lee, G L Liu, F Kim, *et al.* Remote optical switch for localized and selective control of gene interference [J]. NIHPA, 2009, 9(2): 562-570.
- 7 D B Wolfe, D V Vezenov, B T Mayers, *et al.* Diffusion-controlled optical elements for optofluidics [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(18): 181105.
- 8 N T Nguyen, T F Kong, J H Goh, *et al.* A micro optofluidic splitter and switch based on hydrodynamic spreading [J]. J Micromech Microeng, 2007, 17(11): 2169-2174.
- 9 Z Y Li, Z Y Zhang, T Emery, *et al.* Single mode optofluidic distributed feedback dye laser [J]. Opt. Express, 2006, 14(2): 696-701.
- 10 H Cole, S Morris. Liquid-crystal lasers [J]. Nature Photon, 2010, 4(10): 676-685.
- 11 A F Naumov, M Y Lovkvetv, I R Guralnik, *et al.* Liquid-crystal adaptive lenses with modal control [J]. Opt Lett, 1998, 23(13): 992-994.
- 12 K S Lee, S B Kin, K H Lee, *et al.* Three-dimensional microfluidic liquid-core/liquid-cladding waveguide [J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(2): 021109.
- 13 Y Fainman, L P Lee, D Psalis, *et al.* Optofluidics, Fundamentals, Devices, and Applications [M]. New York: McGraw Hill, 2010.
- 14 Korfmacher W A. Foundstion review: principles and applications of LC-MS in new drug discovery [J]. Drug Discov Today, 2005, 10(20): 1537-1637.
- 15 Chih-Wei Wu, Gwo-Ching Gong. Fabrication of PDMS-based nitrite sensors using teflon AF coating microchannels [J]. IEEE Sens J, 2008, 8(5): 465-469.
- 16 L Zhu, Y Huang and A Yariv. Integrated microfluidic variable optical attenuator [J]. Opt Express, 2005, 13(24): 9916-9921.
- 17 H Yu, G Zhou, F S Chau, *et al.* A variable optical attenuator based on optofluidic technology [J]. J Micromech Microeng, 2008, 18(11): 111516.
- 18 M I Lapsley, S S Lin, X Mao, *et al.* An in-plane, variable optical attenuator using a fluid-based tunable reflective

- interface [J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(8): 083507.
- 19 Xionggui Tang, Rujian Li, Jinkun Liao, *et al.*. A scheme for variable optofluidic attenuator: design and simulation [J]. Opt Commun, 2013, 305: 175–179.
- 20 D Erickson, T Rockwood, T Emery, *et al.*. Nanofluidic tuning of photonic crystal circuits [C]. SPIE, 2007, 6475: 647513.
- 21 D Nilsson, S Balslev, A Kristensen. A microfluidic dye laser fabricated by nanoimprint lithography in a highly transparent and chemically resistant cyclo-olefin copolymer (COC). [J]. J Micromech Microeng, 2005, 15(2): 296–300.
- 22 D Psaltis, S R Quake, C Yang. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics [J]. Nature, 2006, 442(7101): 381–386.
- 23 D J Wolfe, R S Conroy, P Garstecki, *et al.*. Dynamic control of liquid core/liquid-cladding optical waveguides [J]. PNAS, 2004, 101(34): 12434–12438.
- 24 Wenjie Lan, Shaowei Li, Jianhong Xu, *et al.*. Synthesis of titania-silica core-shell microspheres via a controlled interface reaction in a microfluidic device [J]. Langmuir, 2011, 27(21): 13242–13247.
- 25 Liang Zhongcheng Zhao Rui. Optofluidics and its potential applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(6): 16–23.
- 梁忠诚, 赵瑞. 微流控光学及其应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(6): 16–23.