

基于微流控技术的新型可调光衰减器

万 静¹ 郭安金¹ 严 峰² 张 帅¹ 梁忠诚^{1*}

(¹ 南京邮电大学光电工程学院微流控光学技术中心, 江苏 南京 210023)
² 南京中兴新通信研究所, 江苏 南京 210012

摘要 基于微流控技术提出了一种新型可调光衰减器核心芯片结构,利用微流体和可压缩空气实现光衰减的可控调节,并基于此核心芯片设计了两种应用不同驱动技术的微流控光衰减器。通过高斯光束传播理论、亥姆霍兹方程、光场耦合理论与 Mathematics 软件分析了光衰减器内部光场分布特性,考虑了流体端面衍射影响,给出了流体端面位置与衰减量的关系及响应时间等性能参数。理论表明基于微流控技术的可调光衰减器衰减范围大于 50 dB,系统响应时间约为 0.01 s,具有衰减范围大、响应快、插入损耗小、回波损耗大的优点。所提出的光衰减器为寻求小体积、高性能、易集成、灵活可调的新型光通讯器件提供了新的思路。

关键词 光学器件;微流体;可调光衰减器;流体;衰减量

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0923001

A New Variable Optical Attenuator Based on Microfluidics

Wan Jing¹ Guo Anjin¹ Yan Feng² Zhang Shuai¹ Liang Zhongcheng¹

(¹ Center for Optofluidic Technology, Photoelectric Engineering College, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China
² ZTE Corporation Nanjing R&D Center, Nanjing, Jiangsu 210012, China)

Abstract Here the core structure of a new variable optical attenuator (VOA) based on microfluidics is presented, where the microfluid and compressible air are used to continuously change the optical energy by adjusting the attenuator. Based on this core structure, two variable optical attenuators using different driving technologies are given. By the propagation theory of Gaussian beam, Helmholtz equation, mode-coupling theory and Mathematics software, the optical field and characteristics of this VOA are researched in theory and the diffraction effect is discussed. The theory results indicate this VOA has big attenuation range (50 dB), quick response (0.01 s), small insertion loss and strong return loss. The presented attenuator can provide a new method for development of small, integrated and adjustable optical communication devices.

Key words optical devices; microfluidics; variable optical attenuator; fluid; attenuation

OCIS codes 230.3990; 350.4600; 060.4510

1 引 言

随着全光通信技术的发展,可调光衰减器 (VOA)已成为光纤通信系统中一种重要的光纤无源器件,广泛应用于波分复用系统的信道增益平衡和器件保护等领域^[1]。目前市场上 VOA 价格昂贵,成为阻碍光纤通信系统普及的障碍之一。现有的可调光衰减器以微机电系统 (MEMS) 衰减器为主,通常采用微型步进机控制连续渐变衰减片旋转或平移进行可

调衰减^[2],因而成本高,体积较大,难以集成于日益缩小的光通信模块中,不能满足未来快速发展的光通信网络的要求。采用新技术、新材料且具备可集成化的可调光衰减器是目前的研究发展趋势。

微流控光器件是光学与微流控技术相结合而形成的新型器件,它利用微/纳升液体来创建可调的光学系统,已应用于众多领域,显示出广阔的应用前景^[3-7]。因其体积小、性能高、易集成、灵活可调等

收稿日期: 2014-03-03; **收到修改稿日期**: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(60878037)、南京邮电大学基金(NY208002)

作者简介: 万 静(1971—),女,硕士,副教授,主要从事微流控光学与现代应用光学方面的研究。

E-mail: wanj@njupt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 1536676758@qq.com

优点也将成为新型光通讯器件众多解决方案中有力的竞争者之一^[8]。但是国内外有关微流控光通信器件的研究报道并不多,尤其是光衰减器。近年来出现了利用电润湿变焦微透镜的微流控光衰减器^[9],但是基于电润湿的光器件结构较复杂,所需电压高^[10-11]。本文提出了一种新型微流控可调光衰减器核心芯片结构,利用微流体和可压缩空气实现光衰减的可控调节,结构简单、易集成、可拓展,具有良好的操控性和适应性。

2 器件结构设计与工作原理

基于微流控技术的可调光衰减器芯片采用三明治结构,如图 1 所示。第一层为盖片;第二层为核心工作层,在均匀透明方形介质左右两侧刻两个 V 型水平槽,其中心轴在同一条线上,然后放置入射、出射光纤准直器,沿方形介质对角线方向有一细长微流道,与左上角储液池相通,微流道上方密封,液体将微流道另一端堵成封闭气室;第三层为基底。V 型槽设计有利于两光纤准直器精确放置,中心对准。微流道中的流体是与方形介质折射率相同或相近的匹配液。储液池与液体驱动装置相连,驱动可利用静电^[12-13]、气压^[14]、电磁^[15-16]、电泳与电渗^[17]等方式。

基于微流控技术的可调光衰减器工作原理如图 2 所示,当驱动装置如气压泵^[12]对储液池中液体施压时,微流道中的流体流动至新的位置,与另一端的

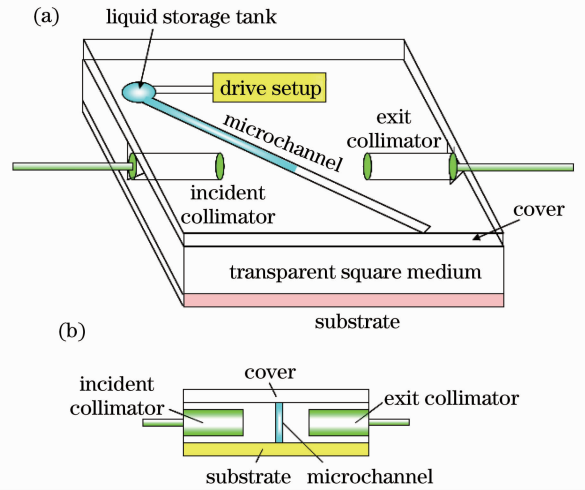


图 1 基于微流控技术的可调光衰减器核心芯片结构。(a)系统结构示意图;(b)横截面示意图

Fig. 1 Core structure of the variable optical attenuator chip based on microfluidics. (a) Structure of the system; (b) sketch of the cross section

气体达成新的平衡。假设平衡位置如图 2 所示,入射到微流道液体界面的光由于液体的折射率与方形介质折射率相同或相近,几乎无损耗耦合进出射光纤准直器;入射到微流道气体界面的光则发生全反射,被方形介质一侧涂覆的吸光材料吸收,从而使光能量衰减,此时微流道一端的气体相当于一个空气挡光片。施加不同的外界压力,平衡时流体端面位置不同,衰减量不同。通过控制微流道中流体位置实现光衰减量的可控调节。

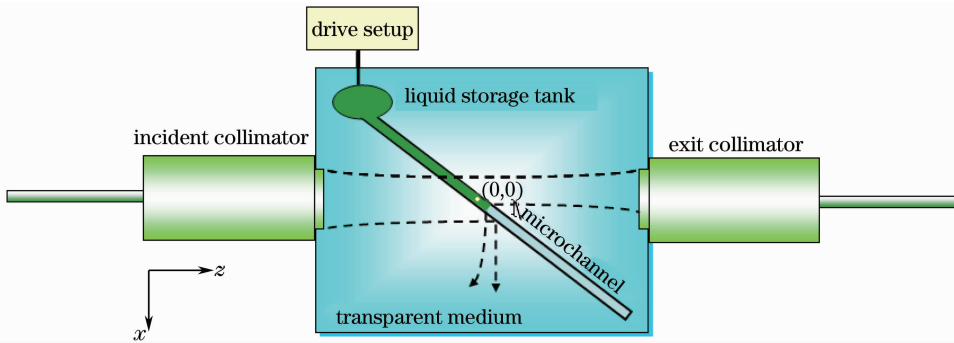


图 2 基于微流控技术的可调光衰减器工作原理图

Fig. 2 Principle sketch of the variable optical attenuator based on microfluidics

于电磁驱动的光衰减器,其中:1-方形透明介质,2-微流道,3-小孔,4-工作层,5-出射光纤准直器,6-入射光纤准直器,7-吸光材料层,8-盖片,9-注液孔,10-输液管,11-电磁铁,12-接线孔,20-基底;右侧图是电磁驱动装置:13-电磁铁,14-永磁铁圆片,15-盖子,16-透明弹性薄膜,17-储液腔,18-电磁线圈,19-电源线。基于电磁驱动的可调光衰减器通过电磁铁上下

于电磁驱动的光衰减器,其中:1-方形透明介质,2-微流道,3-小孔,4-工作层,5-出射光纤准直器,6-入射光纤准直器,7-吸光材料层,8-盖片,9-注液孔,10-输液管,11-电磁铁,12-接线孔,20-基底;右侧图是电磁驱动装置:13-电磁铁,14-永磁铁圆片,15-盖子,16-透明弹性薄膜,17-储液腔,18-电磁线圈,19-电源线。基于电磁驱动的可调光衰减器通过电磁铁上下

移动来驱动液体上升下降,改变进入出射准直器的光通量,实现光衰减量的调节,结构较复杂,响应速度也相应较慢,体积更大,但并不比一些机械式光衰减器更大更复杂^[19]。这两种光衰减器核心结构相

同,驱动技术不同,结构体积、制作工艺难易程度、系统响应时间等也不同,由此可见流体驱动技术对微流控器件的重要性。

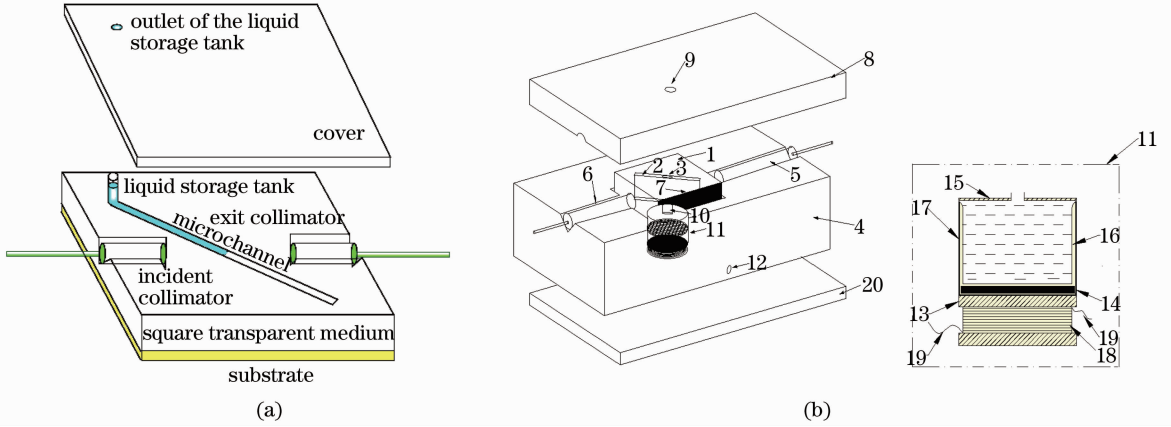


图 3 基于两种不同驱动技术的微流控可调光衰减器。(a)气压驱动;(b)电磁驱动

Fig. 3 Two variable optical attenuators based on different drive techniques. (a) Air drive; (b) electromagnetic drive

3 可调光衰减器内部光场与性能分析

3.1 光场分析

光衰减器内部两准直器之间的光场可分为流道前方入射光场和流道后方光场两部分。前方入射光场在弱导情况下可以用高斯场表示,后方光场包括直接透过流道流体的光和流体端面衍射的光。设光衰减器应用于单模光纤中,运用高斯光束传播理论、亥姆霍兹方程、光场耦合理论、Mathematics 软件进行理论分析如下:

1) 基模高斯光场^[19]

弱导情况下,基模高斯光场表示为

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right) \exp(ikz), \quad (1)$$

参见图 2,当微流道中匹配液切入光场时,设流体端面在 x 轴上投影坐标为 a_x ,不考虑衍射时透光位置函数为

$$M(x) = \begin{cases} 1, & x < a_x \\ 0, & x > a_x \end{cases}, \quad (2)$$

通过微流道后光场为

$$\varphi_1(x, y, z) = \varphi_0 M(x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right) \exp(ikz) & -\infty < x < a_x \\ 0 & x > a_x \end{cases}. \quad (3)$$

2) 衍射光场

均匀透明方形介质可选聚二甲基硅氧烷聚合物(PDMS,折射率为 1.467),匹配液可选择体积分数为 96% 的甘油(C₃H₈O₃,丙三醇),其折射率为 1.4675^[18],流道中流体端面(气液分界面)是凸面。光在流体端面的衍射对系统的性能将产生一定的影响。如果对气/液界面进行优化,使三相接触角约为

90°,即气液分界面由凸面变为近似平面,减少衍射面积,则可减少衍射的影响。Grillet 等^[20]通过添加一些表面活性剂(例如,含氟添加剂)来改变微流道中液体的表面能从而得到一个近似平面的气液分界面,气/液界面优化为平面后的衍射场如下:

亥姆霍兹方程:

$$\varphi(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} \varphi(k_x, k_y) \exp\{-i[k_x x + k_y y + (k^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2} z]\} dk_x dk_y, \quad (4)$$

对该式进行傅里叶变换,在傍轴条件下,可以得到衍射后的光场为^[21]

$$\varphi_2(x, y, z) = 2A_0 \pi \sqrt{\pi} \exp(ika_x) (1+i) \sqrt{\frac{k^2}{kz\omega_0^2 - 2iz^2}} \exp(-ikz) \exp\left(-\frac{ky^2}{k\omega_0^2 - 2iz^2}\right) \int_a^\infty \exp\left(-\frac{x'^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{ik}{2z}(x-x')^2\right] dx' \quad (5)$$

取工作波长为 1550 nm 的 Grin 准直器,设光束传输距离 $z=10$ mm,单模光纤模场半径为 $5.25 \mu\text{m}$,则准直器间光束束腰半径 $\omega_0 = 0.18$ mm。利用

Mathematics 软件仿真得到的微流道光入射处与出射准直器接收端面的光强分布如图 4~6 所示。

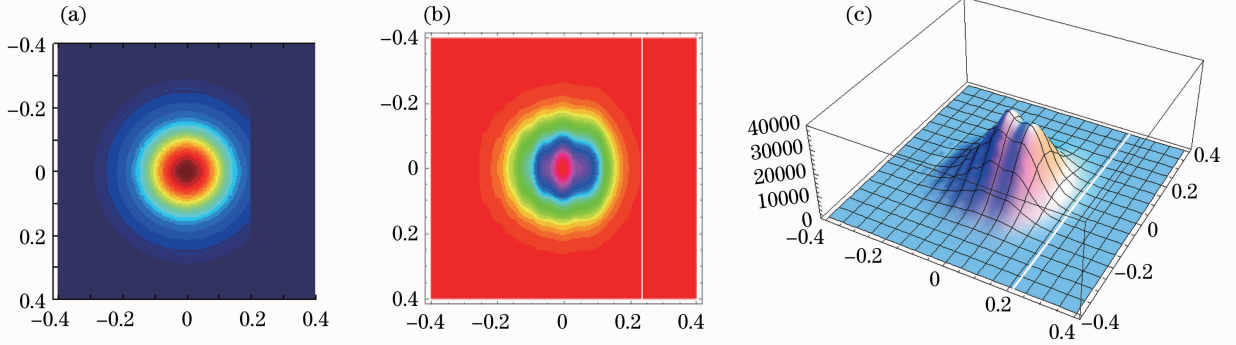


图 4 $a_x = \omega_0$ 时,光斑与三维光强分布图。(a)微流道处光斑;(b)出射准直器端面光斑;(c)出射准直器端面三维光强分布
Fig. 4 Optical spots and 3D distribution of intensity at $a_x = \omega_0$. (a) Optical spot at the microchannel; (b) optical spot at the exit collimator; (c) 3D distribution of optical intensity at the exit collimator

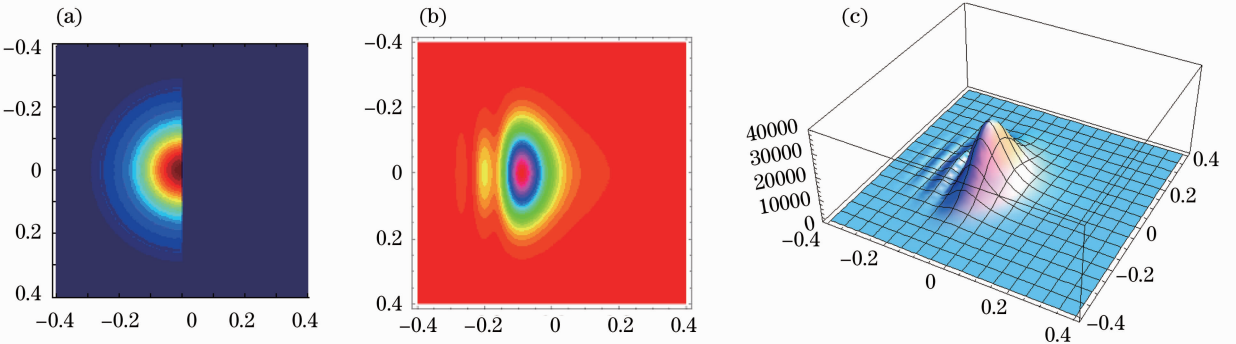


图 5 $a_x = 0$ 时,光斑与三维光强分布图。(a)微流道处光斑;(b)出射准直器端面光斑;(c)出射准直器端面三维光强分布
Fig. 5 Optical spots and 3D distribution of intensity at $a_x = 0$. (a) Optical spot at the microchannel; (b) optical spot at the exit collimator; (c) 3D distribution of optical intensity at the exit collimator

图 4~6 的各个(a)、(b)图中,中心红色表示光强最大值。由图(b)和(c)可知,流体端面位置为 $a_x = \omega_0$ 时,很少光被反射,绝大部分光透过液体到达出射准直器表面,光能量分布扰动最小;随着流体端面位置从 $a_x = \omega_0$ 到 $a_x = -\omega_0$ 逐渐变化,被全反射损耗掉的光能量越来越多,流道后方光场的光强逐渐减弱。而且受到衍射影响,流道后方的光强不再呈现高斯分布,不仅光强逐渐减小,光强最大值位

置也逐渐远离中心轴。

由图 7 也可明显看出,通过微流道后由于衍射的影响,流道后方的光场不再是标准的高斯光束。随着流体端面位置从 $a_x = \omega_0$ 到 $a_x = -\omega_0$ 逐渐变化,光强在不断减小,当 $a_x = -\omega_0$ 时,光信号能量已经很微弱,几乎全部全反射损耗了。光强最大值的位置也发生变化,不断远离中心位置。

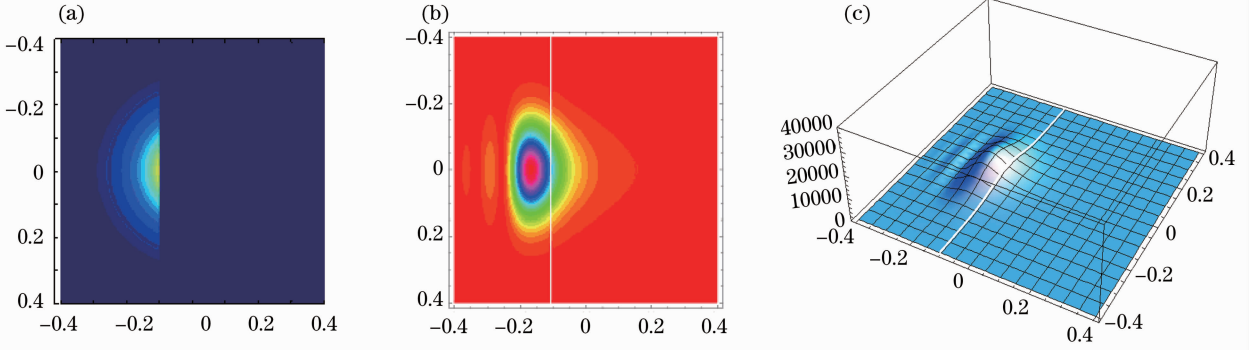


图 6 $a_x = -1/2\omega_0$ 时,光斑与三维光强分布图。(a)微流道处光斑;(b)出射准直器端面光斑;
(c)出射准直器端面三维光强分布

Fig. 6 Optical spots and 3D distribution of intensity at $a_x = -1/2\omega_0$. (a) Optical spot at the microchannel; (b) optical spot at the exit collimator; (c) 3D distribution of optical intensity at the exit collimator

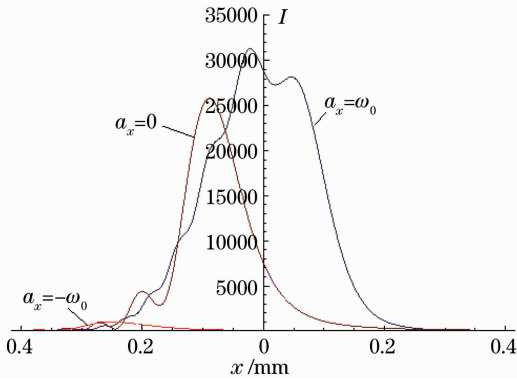


图 7 流体端面在不同位置时出射准直器端面上光强在 X 轴方向的分布

Fig. 7 X directional distribution of optical intensity on the inlet of the exit collimator at different locations

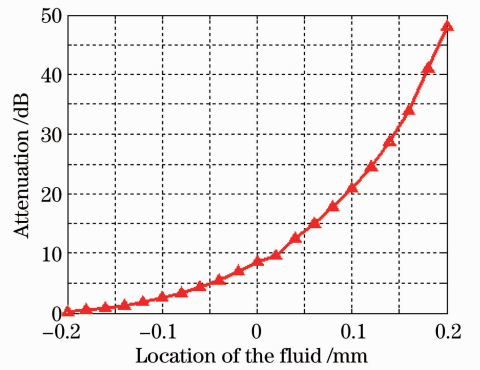


图 8 流体端面位置与衰减量的关系

Fig. 8 Relation of the location and attenuation of the fluid 知,流体端面对应 x 坐标的位置从 $-\omega_0$ 移动到 $+\omega_0$ 时,光信号的衰减量变化 50 dB。

3.2 可调光衰减器性能分析

可调光衰减器的衰减量由两部分组成:1)由空气挡光片全反射产生的衰减量(L_1);2)光场在流体端面发生衍射而产生的模场失配损耗(L_2)。根据模场耦合理论,总衰减损耗为

$$L = L_1 + L_2 = -10\lg \frac{\left| \iint_S \varphi_0 \varphi_1 dS \right|^2}{\iint_S |\varphi_0|^2 dS \times \iint_S |\varphi_1|^2 dS} - 10\lg \frac{\left| \iint_S \varphi_0 \varphi_2 dS \right|^2}{\iint_S |\varphi_0|^2 dS \times \iint_S |\varphi_2|^2 dS}. \quad (6)$$

φ_0 和 φ_1, φ_2 由上节理论得到,由 Mathematics 软件给出光衰减量与流体端面位置关系如图 8 所示。

若想实现光能量的全衰减,微流道中流体的驱动行程在 x 轴对应变化范围应为 $2\omega_0$ 以上。由图 8

对于图 2(a)所示基于气压驱动的微流控可调光衰减器,系统响应时间由施加驱动压后微流道内流体达到稳定时的时间决定。设微流道中气腔的长、宽、高分别为 $l = 3500 \mu\text{m}$, $d = 5 \mu\text{m}$, $h = 400 \mu\text{m}$,经 Fluent 6.1 软件仿真,得到不同时刻流道流速分布图以及不同驱动压力下的时间响应曲线,如图 9、10 所示。

图 9 中红色表示流速较快的区域,蓝色表示慢速区,初始微流道中流体处于非稳定的动态,而在 0.01 s 时基本趋于稳定不动的状态。由图 10 可知,施加驱动压力后,0~0.002 s 内,流体端面移动较快;在 0.002~0.01 s,流动减缓,逐渐趋于稳定;0.01 s 后,气液两端压力达到平衡,流体不再移动。因此压控式微流控可调光衰减器的系统响应时间约为 0.01 s。理论计算的各项性能参数如表 1 所示。

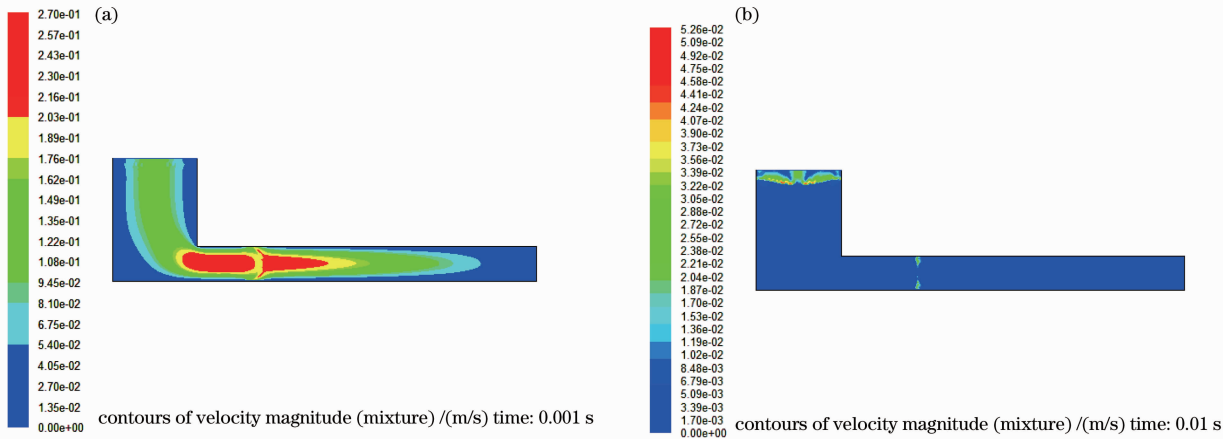


图 9 微流控可调光衰减器微流道速度分布图,驱动压 $P=16$ kPa。(a)时间 0.001 s; (b) 时间 0.01 s

Fig. 9 Contours of velocity magnitude in the microchannel of the variable optical attenuator based on microfluidics, $P=16$ kPa. (a) $t=0.001$ s; (b) $t=0.01$ s

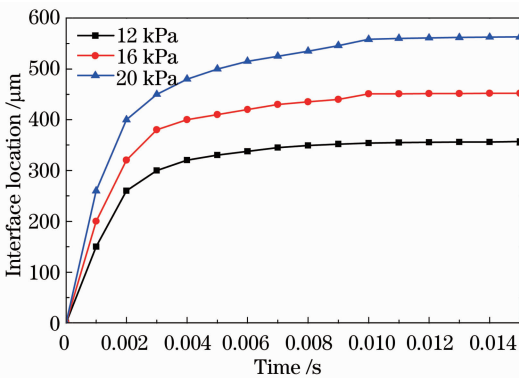


图 10 不同驱动压力下的时间响应曲线

Fig. 10 Time response curves at different drive forces

表 1 微流控可调光衰减器性能参数

Table 1 Performances of the variable optical attenuator based on microfluidics

Working wavelength	Attenuation range	Insertion loss	Return loss
1310 nm/1550 nm	>50 dB	<0.2 dB	>60 dB

由表 1 可知,所提出的基于微流控技术的可调光衰减器具有衰减范围大、插入损耗小、回波损耗大的优点。

4 结 论

提出了一种基于微流控技术的新型可调光衰减器核心芯片结构,利用微流体和可压缩空气实现光衰减的可控调节。同时基于此核心芯片给出了两种基于不同驱动技术的微流控光衰减器,并借此指出流体驱动技术对微流控光器件的重要性。所提出的可调光衰减器以流体作为控制元素,可实现光能量

的全通与全减,因而具有比较大的衰减范围。通过高斯光束传播理论、亥姆霍兹方程、光场耦合理论、Mathematics 软件分析了光衰减器内部光场分布与性能,考虑了流体端面衍射影响,给出了流体端面位置与衰减量的关系。理论表明基于微流控技术的光衰减器衰减范围达 50 dB,系统响应时间约为 0.01 s,具有衰减范围大、插入损耗小、回波损耗大的优点。所提出的光衰减器为寻求体积小、性能高、易集成、灵活可调的新型光通讯器件提供了新的思路。

参 考 文 献

- 1 K Hirabayashi, M Wada, C Amano. Compact optical-fiber variable attenuator arrays with polymer-network liquid crystals [J]. Appl Opt, 2001, 40(21): 3509–3517.
- 2 N A Riza, S A Reza. Broadband all-digital variable fiber-optic attenuator using digital micro-mirror device [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(21): 1705–1707.
- 3 David Erickson. Special issue on “Optofluidics” [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2008, 4(1): 1–2.
- 4 J R Adleman, D A Boyd, D Goodwin, *et al.*. Optofluidic technologies [C]. IEEE, 2007. 66–67.
- 5 Todd M Squires, Stephen R Quake. Microfluidics: fluid physics at the nanoliter scale [J]. Reviews of Modern Physics, 2005, 77(3): 977–1026.
- 6 Hong Cai, Andrew W Poon. Optical manipulation of microbeads in an integrated optofluidic device [C]. CLEO, 2010; JWA70–72.
- 7 Andrew W Poon, Shaoqi Feng, Ting Lei, *et al.*. Silicon microresonators for on-chip optical interconnects and optofluidics [C]. CLEOPR, 2012; C61–63.
- 8 A J Chung, D Erickson. Optofluidic waveguides for reconfigurable photonic systems [J]. Opt Express, 2011, 19(9): 11995–12001.
- 9 A R Syed, A R Nabeel. A liquid lens-based on broadband variable fiber optical attenuator [J]. Opt Commun, 2009, 282(7): 1298–1303.
- 10 Pei Yu Chiou, Hyejin Moon, Hiroshi Toshiyoshi, *et al.*. Light actuation of liquid by optoelectrowetting [J]. Sensors and Actuators, 2003, 104(3): 222–228.

- 11 Wu Jiangang, Yue Ruifeng, Zeng Xuefeng. Droplet actuating chip using the electrowetting-on-dielectric method [J]. J Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(7): 1342-1344.
吴建刚, 岳瑞峰, 曾雪峰. 基于介质上电润湿原理的微液滴驱动芯片[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(7): 1342-1344.
- 12 Xu Ning, Zhu Yongmei, Sun Xiaoyun, *et al.*. Design of and research on a novel optical switch based on piezoelectric ceramics [J]. Study on Optical Communications, 2011, 106(4): 32-35.
徐 宁, 朱永梅, 孙晓云, 等. 基于压电陶瓷的光开关结构与实验研究[J]. 光通信研究, 2011, 106(4): 32-35.
- 13 Xu Ning, Li Ruomei, Tu Xinghua, *et al.*. Design of new optical switches based on microfluidic technology [J]. Journal of Nanjing University of Posts & Telecommunications (Nature Science), 2009, 29(2): 22-25.
徐 宁, 李若梅, 涂兴华, 等. 基于微流控技术新型光开关器件设计[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009, 29(2): 22-25.
- 14 Wan Jing, Liang Zhongcheng. A Variable Optical Attenuator Based on Microfluidics: China, CN 102608756 [P]. 2012-07-25.
万 静, 梁忠诚. 基于微流控光学技术的压控可调光衰减器: 中国, CN 102608756 [P]. 2012-07-25.
- 15 Wan Jing, Wang Zhibo, Zhou Xiaotao, *et al.*. Study electromagnetic pump based on ionic liquids [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 437(3): 540-543.
- 16 Guo Anjin, Wan Jing, Liang Zhongcheng, *et al.*. A Variable Optical Attenuator Based on Electromagnetic Control: China, CN 201210248214.1[P]. 2012-10-24.
郭安金, 万 静, 梁忠诚, 等. 一种基于电磁控制的可调光衰减器: 中国, 201210248214.1[P]. 2012-10-24.
- 17 Nataliya A Mishchuk, Trond Heldal, Tormod Volden, *et al.*. Micropump based on electroosmosis of the second kind [J]. Electrophoresis, 2009, 30(20): 3499-3506.
- 18 L P Maaik, K Saghar, J B Paul, *et al.*. Surface modification of PDMS via self-organization of vinyl-terminated small molecules [J]. Soft Matter, 2009, 5(11): 2286-2293.
- 19 Cao Zhonghui, Zou Yongzhuo, Wu Xingkun. A design for a digitalized variable optical attenuator [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(5): 17-23.
曹钟慧, 邹勇卓, 吴兴坤. 一种数字化可调光衰减器的设计[J]. 光电工程, 2004, 31(5): 17-23.
- 20 C Grillet, P Domaxchuk, B J Eggleton, *et al.*. Compact tunable microfluidic interferometer [J]. Opt Express, 2004, 12(22): 5440-5447.
- 21 Ma Kun, Sun Junqiang, Li Chuanwen, *et al.*. Study on the diffraction characteristic of Gaussian beam baffled by a blade in variable optical attenuator [J]. Study on Optical Communications, 2005, 128(2): 67-70.
马 琨, 孙军强, 李传文, 等. 可变光衰减器中高斯光束的衍射特性研究[J]. 光通信研究, 2005, 128(2): 67-70.

栏目编辑: 韩 峰