

# 基于液体光阑的微流控可变光衰减器阵列

万静\*, 俞廷杰, 陈建松, 周瑞, 万洪丹

(南京邮电大学电子与光学工程学院, 柔性电子(未来技术)学院, 江苏南京 210023)

**摘要:** 可变光衰减器 (Variable optical attenuator, VOA) 广泛应用于光通信和光电子系统中, 然而很少有 VOA 阵列的报道。本文提出一种基于液体光阑的微流控 VOA 阵列, 利用螺旋形轨道实现多光束能量同步非等量衰减, 或者使用环形轨道同步等量衰减, 其中液体光阑的透光孔径通过介质上电润湿效应调节。该 VOA 阵列结构紧凑、体积小、操作简单、成本低, 可灵活调整多光束之间的衰减比以实现多信道功率均衡。研究结果表明: 所提微流控 VOA 阵列具有超越一般 VOA 阵列的宽衰减范围 (0~100% 衰减) 和很小的插入损耗 (0.26 dB), 响应时间为 0.1 ms, 对偏振不敏感。它也能兼作光开关阵列。所提 VOA 阵列展示了集成和高性能潜力, 并为应用提供一种经济有效的方式。

**关键词:** 微流控光学; 可变光衰减器阵列; 液体光阑; 介质上电润湿

中图分类号: O439

文献标识码: A

## Liquid stop based microfluidic variable optical attenuator array

WAN Jing\*, YU Ting-Jie, CHEN Jian-Song, ZHOU Rui, WAN Hong-Dan

(School of Electronic and Optical Engineering, School of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Variable optical attenuator (VOA) arrays can be widely applied in optical communication and optoelectronic systems, but few VOA arrays are reported. Here a liquid-stop based microfluidic VOA array is proposed. It uses a spiral orbit to achieve different degrees of synchronous energy attenuation of multiple beams, or uses an annular orbit to achieve a same degree of synchronous energy attenuations, where the clear aperture of liquid stop is regulated by the electrowetting-on-dielectric effect. It has a compact structure, small volume, simple operation and low cost. Meanwhile, the attenuation ratio of beams can be flexibly adjusted to achieve the power equalization. The research results indicate that the VOA array has a wide attenuation range (0-100% attenuation) and very small insertion loss (0.26 dB) over general VOA arrays. The response time is 0.1 ms, and it is insensitive to the polarization. It can also act as an optical switch array. The proposed VOA array demonstrates the potential of integration and high performance, and it can provide a cost-effective way for applications.

**Key words:** optofluidics, variable optical attenuator array, liquid stop, electrowetting-on-dielectric

## 引言

可变光衰减器 (Variable optical attenuator, VOA) 常用于动态地控制光源功率和放大器增益, 可防止接收前端过载, 实现动态信道功率均衡, 避免多信道系统的光路切换串扰等。VOA 广泛应用于光通信<sup>[1-2]</sup>以及光电子系统中<sup>[3-4]</sup>。常见的有微电机系统 (MEMS) VOA、热光 VOA、磁光 VOA、光栅 VOA、液晶 VOA。其中 MEMS VOA 光学性能好, 但

是机械移动部件使其体积较大且不易集成, 不易制作 VOA 阵列。后面几种 VOAs 通常插入损耗和偏振相关损耗大、衰减范围小 (一般 0~20 dB), 且需要温度补偿。如, Yin Y 等人<sup>[5]</sup>报道了一种热光 VOA, 在 O 波段具有 6.99 dB 的衰减量和 18.64 dB 的消光比以及 0.18 ms 的响应时间。刘斌等人<sup>[6]</sup>报道的反射式 MEMS VOA 具有 0~60 dB 的衰减范围和 0.5 dB 插入损耗以及 3 ms 的响应时间。

收稿日期: 2024-01-01, 修回日期: 2024-02-04

Received date: 2024-01-01, Revised date: 2024-02-04

基金项目: 中国国家自然科学基金 (12174199)、万静自然学科横向科研发展基金 (HJ1060319960015)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (12174199), Wanjing Natural Science Cross disciplinary Research and Development Fund (HJ1060319960015)

作者简介 (Biography): 万静 (1971—), 女, 重庆人, 南京邮电大学副教授, 博士, 研究方向: 微流控光学、光通信器件。

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wanj@njupt.edu.cn

现有报道大多数是单个的VOA。然而,在多信道系统中,比如波分复用(WDM)系统,若每个信道都使用一个VOA,则成本高、体积大且操作复杂。而降低基础部件的成本是复杂传输与网络模式中达成经济可行性的核心。集成的VOA阵列可以同时控制多个信道的光衰减,成本低、体积小、结构紧凑。关于VOA阵列的研究报道很少。Hairabayashi等人<sup>[7]</sup>报道了一种基于液晶的光纤VOA阵列,对1550 nm波长有7.5 dB的衰减范围和0.8 dB的插入损耗。任梅珍等人<sup>[8]</sup>基于平面光波环路技术提出的4路VOA阵列具有30 dB的衰减范围和0.7 dB的平均插入损耗以及0.882 dB~1.91 dB偏振相关损耗。

微流控光学(Optofluidics)<sup>[9]</sup>是微流控技术与光电子学相结合的前沿学科,因其可调性、集成化和小型化的特点而备受关注。介质上电润湿(electrowetting-on-dielectric, EWOD)效应<sup>[10]</sup>具有制作简单、响应时间快、易操作和功耗低等突出优点,常应用于液体透镜<sup>[11,12]</sup>、光学显示器<sup>[13,14]</sup>、光波导耦合器<sup>[15]</sup>等微流控光器件中。微流控VOA仅有少量的报道且是单个VOA。如Dudus等人<sup>[16]</sup>报道了一种基于磁流体驱动的VOA,衰减范围是26 dB,其它性能指标没阐述。

利用介质上电润湿效应,本文提出基于液体光阑的微流控VOA阵列。它分别使用螺旋轨道和环形轨道实现多光束能量同步非等量或同步等量衰减,应用灵活。所提微流控VOA阵列比一般VOA阵列具有更大的衰减范围(0~100%衰减)和更小的插入损耗(0.26 dB),对偏振不敏感,多光束同步可调的阵列形式可使应用更加经济有效。它也能兼作光开关阵列。

## 1 结构与工作原理

微流控VOA阵列由液体光阑(Liquid stop)、轨道(orbit)、输入/输出准直器阵列(Input/Output collimator arrays)组成,其中轨道有螺旋轨道和环形轨道两种。图1是基于螺旋轨道(Spiral orbit)的微流控VOA阵列。如图1(b)所示,螺旋轨道由中心直径为0.2 mm的圆逐渐向外螺旋形展开,相邻轨道内侧间隔1 mm。轨道由马氏体不锈钢制作。准直器外壳包裹掺磁性微粒的弹性橡胶膜,外直径1 mm,可固定于螺旋轨道。输出准直器阵列与输入准直器阵列中心轴一一对齐。

如图1(c)所示,液体光阑包括圆柱形腔、导电

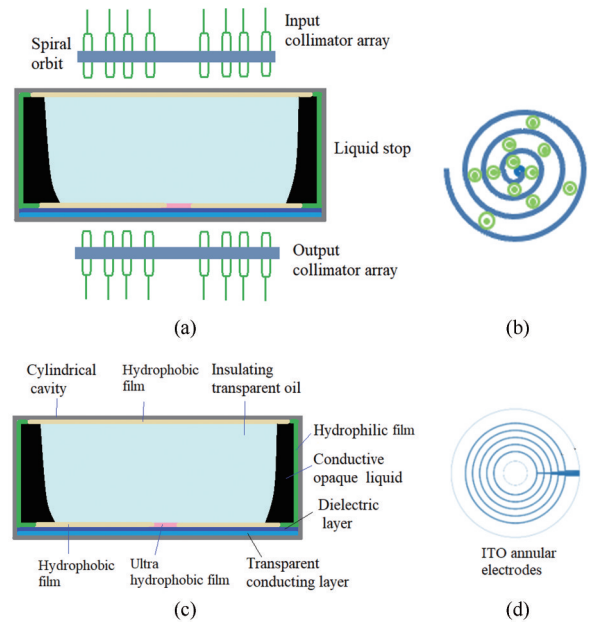


图1 VOA阵列的结构示意图:(a)VOA阵列结构;(b)螺旋轨道,其中有实心点的小圈是镶嵌其中的准直器;(c)液体光阑;(d)ITO环形电极

Fig. 1 Structure diagram of the VOA array: (a) VOA-array structure; (b) Spiral orbit, where the small circles with solid points are collimators; (c) Liquid stop; (d) ITO annular electrodes.

不透明液体、绝缘透明油、介质层和透明导电层。腔内上、下底面涂有疏水膜(如特氟龙等),其中底部中心有一小块圆形超疏水膜。超疏水膜是用含氟聚合物表面改性的微纳米结构,可防止周围不透明液体合并导致不易复原。腔内侧面涂有亲水膜,以加强侧壁对液体的吸附力。腔底部疏水膜下是介质层,然后是透明导电层。透明导电层中有一组氧化锡锡(indium tin oxide, ITO)环形电极,如图1(d)。圆柱形腔由SiO<sub>2</sub>玻璃制成,壁厚度为500 μm,底面半径为3.5 mm,高度为2 mm。

导电不透明液体选用炭黑染料和氯化钠(NaCl)溶液的混合物,炭黑浓度为20 mg/L,氯化钠浓度为1 mol/L。炭黑对红外光有很强的吸收作用<sup>[17]</sup>。导电不透明液体的密度为1.07 kg/m<sup>3</sup>,粘度为0.11 MPa·s,对1550 nm波长光的吸收系数是1956 m<sup>-1</sup>,折射率是2.540。绝缘透明液体为硅油,密度为0.95 kg/m<sup>3</sup>,粘度为1.36 MPa·s,对1550 nm波长光的吸收系数为11.65 m<sup>-1</sup>,折射率是1.500。

图2是使用螺旋轨道的同步非等量衰减的VOA阵列的工作原理示意图,其中1~6号圆斑代表6束入射光。如图2(a)所示,初始不加电压时,液体

光阑底部通光孔径比较大。施加电压后,由于电润湿效应,导电不透明液体在底部向中心延伸,透明硅油底部面积缩小,即液体光阑的通光孔径变小,结果部分光束不能全部通过而被衰减。由于各光束离液体光阑中心轴距离不同,故衰减量不同,如图 2(b)所示。调节电压,改变液体光阑的通光孔径,可同步调节各光束的衰减量。调节螺旋轨道中各准直器的相对位置,可得到不同的衰减比,使多个不同输入功率的光束获得相同的输出功率,实现功率均衡,或根据应用需要预设阵列中各光束的输出功率比。由于选择的是非双折射材料,光路又很短,所以此 VOA 阵列对偏振不敏感。

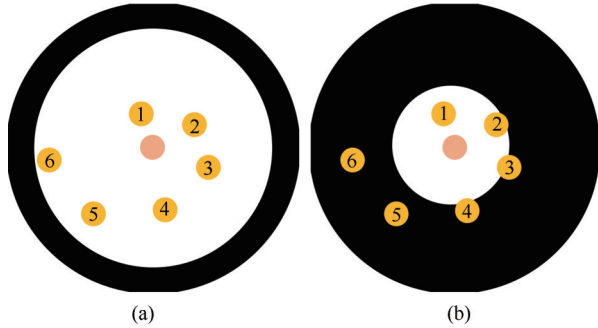


图 2 螺旋轨道 VOA 阵列工作原理图:(a)初始状态(电压  $V=0$ );(b)衰减状态(电压  $V>0$ )

Fig. 2 Working principle diagram of the VOA array with a spiral orbit: (a) Initial state ( $V=0$ ); (b) Attenuation state ( $V>0$ )

如果将螺旋轨道换成如图 3(a)所示的环形轨道,则可同步等量衰减各个光束能量,如图 3(b)和(c),构成同步等量衰减器阵列。

给液体光阑导电层施加电压,由于介质上电润湿(EWOD)效应,液体与固体的接触角  $\theta$  发生变化,由李普曼-杨(Lippmann-Young)方程<sup>[18]</sup>可得,

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2d\gamma_L} V^2 \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon$ 、 $\varepsilon_0$  分别为介质和真空中的介电常数,  $V$  为电压,  $d$  为介质厚度,  $\gamma_L$  为两液体界面的表面张力,  $\theta$  为施加电压时液-固接触角,  $\theta_0$  为不施加电压时静态接触角,本文中  $\theta_0$  为  $119^\circ$ <sup>[19]</sup>。

由于接触角变化引起表面张力梯度,两液体由静止开始运动,然后重新建立平衡。流体运动遵循纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,并满足质量、动量和能量守恒。由于腔内两种液体密度相近,且温度和压力变化不明显,两种液体可看作是压缩的牛顿流体。由此,Navier-Stokes 方程简化为<sup>[20]</sup>,

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \cdot u + \nabla(u) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + \Delta u T)) + F \quad (3)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \Delta T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

其中,  $u$  为流速,  $p$  为压力,  $T$  为温度,  $\rho$  为流体密度,  $\mu$  为流体动力粘度,  $F$  为外力,  $C_p$  为恒压热容,  $Q$  为系统吸收的热量,  $k$  为玻尔兹曼常数。

液体光阑对光束的遮挡作用可用位置函数  $M(x, y)$  表达如下:

$$M(x, y) = \begin{cases} T, & r_0 \pm \sqrt{x^2 + y^2} < R \\ 0, & r_0 \pm \sqrt{x^2 + y^2} > R \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $r_0$  为光束中心轴到液体光阑中心轴的距离,  $T$  为液体光阑的透过率,  $2R$  为液体光阑的通光孔径,  $R$  可随外加电压动态变化。设输入光功率为  $P_0$ , 输出光功率为  $P$ , 则光衰减器的衰减量为:

$$A_n = -10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (6)$$

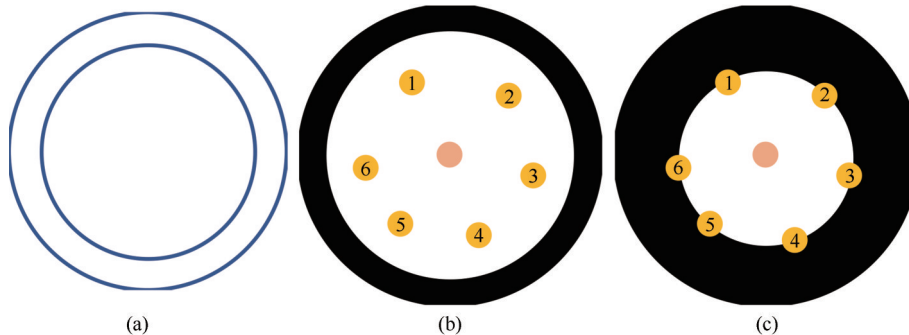


图 3 环形轨道 VOA 阵列工作原理图:(a)环形轨道;(b)初始状态(电压  $V=0$ );(c)衰减状态(电压  $V>0$ )

Fig. 3 Working principle diagram of the VOA array with an annular orbit: (a) Annular orbit; (b) Initial state ( $V=0$ ); (c) Attenuation state ( $V>0$ ).

## 2 分析与讨论

本文利用多物理场仿真软件 COMSOL 研究了基于液体光阑的微流控 VOA 阵列的流场与光学特性。其中,流场分析采用 COMSOL 软件层流、相场模块,求解中使用到李普曼-杨方程和 Navier-Stokes 方程;光场分析采用 COMSOL 软件的光学、波动光学模块。

设介质加疏水膜的总厚度为  $1\ \mu\text{m}$ ,初始状态不施加电压时,液体光阑的通光孔径为  $3.62\ \text{mm}$ 。如图 4 所示,随着外加电压增大,通光孔径渐渐缩小。 $30\ \text{V}$  时通光孔径为  $2.78\ \text{mm}$ 。当电压高于  $36.42\ \text{V}$  时,不透明液体底部迅速合并,不易再复原。故外加电压范围应为  $0\sim 36.42\ \text{V}$ 。 $36.42\ \text{V}$  对应的通光孔径为  $0.38\ \text{mm}$ 。因而液体光阑底部圆形超疏水膜的直径应大于  $0.38\ \text{mm}$ 。本文圆形超疏水膜的直径选取  $0.4\ \text{mm}$ 。

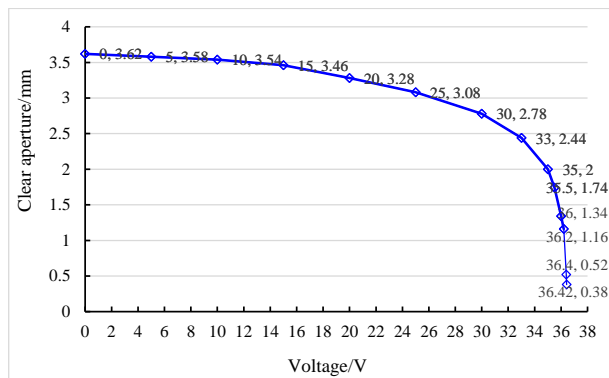


图4 不同电压下的通光孔径

Fig. 4 Clear apertures for different voltages

设图 2(a) 所示螺旋轨道中有六对输入、输出准直器,各准直器中心到液体光阑光轴的距离分别为  $0.70\ \text{mm}$  (No. 1)、 $0.96\ \text{mm}$  (No. 2)、 $1.38\ \text{mm}$  (No. 3)、 $1.65\ \text{mm}$  (No. 4)、 $1.70\ \text{mm}$  (No. 5) 和  $1.85\ \text{mm}$  (No. 6)。入射准直器阵列出射的各激光束光斑半径为  $0.18\ \text{mm}$ ,波长为  $1550\ \text{nm}$ ,输入功率设为  $1\ \text{mW}$ 。不考虑插入损耗时,不同位置的六束光在不同电压下的衰减量如图 5 所示。初始状态不施加电压时,阵列中 No. 1~No. 3 三束光可完全通过液体光阑,而 No. 4~No. 6 三束光部分衰减,衰减量分别为  $2.03\ \text{dB}$ 、 $2.89\ \text{dB}$ 、 $4.21\ \text{dB}$ 。可见,调节各准直器在螺旋轨道中的位置,不施加电压也能得到一定程度的衰减。施加电压则可动态调节各光束非等量同步衰减。随着电压增大,液体光阑的通光孔径逐渐缩小,各光束衰减量逐渐增大。 $20\ \text{V}$  时,六束光的

衰减量分别为  $0.04\ \text{dB}$ 、 $0.22\ \text{dB}$ 、 $0.36\ \text{dB}$ 、 $5.63\ \text{dB}$ 、 $10.21\ \text{dB}$  和  $21.56\ \text{dB}$ 。 $33\ \text{V}$  时, No. 1~No. 4 四束光分别衰减  $0.14\ \text{dB}$ 、 $6.13\ \text{dB}$ 、 $30.21\ \text{dB}$  和  $110\ \text{dB}$ ,而 No. 5 和 No. 6 光束被 100% 完全衰减,达到光开关的功能。因而所提微流控 VOA 阵列也可作光开关阵列。

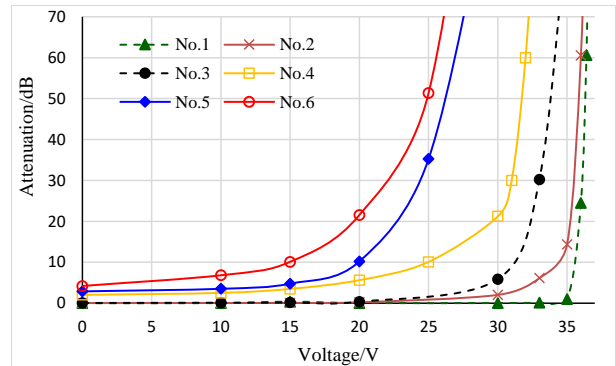


图5 不同电压下的衰减量

Fig. 5 Attenuations for different voltages

螺旋排布的各个光束衰减量是不同的。而使用环形轨道的同步等量衰减的 VOA 阵列中,各个光束衰减量则相同。使用环形轨道的等量衰减 VOA 阵列在不同电压下的动态衰减可参考图 5,如,环形轨道中心半径为  $1.38\ \text{mm}$  时可参考图 5 中 No. 3 的衰减曲线,环形轨道中心半径为  $1.65\ \text{mm}$  时可参考图 5 中 No. 4 的衰减曲线。如果想实现其中几束光等量衰减而其它几束光衰减量各不相同,可分别使用环形轨道 VOA 阵列与螺旋轨道 VOA 阵列来实现。

如图 6 所示,由初始状态施加  $36\ \text{V}$  电压后,腔内两种液体由静止开始运动,液体光阑的通光孔径由初始  $3.62\ \text{mm}$  开始缩小,然后重新建立平衡。图 6(a) 中, $0.01\ \text{ms}$  时液体光阑的通光孔径还比较大。而图 6(b) 中, $0.1\ \text{ms}$  时通光孔径已缩小,虽然此时两液体还未静止,但此后通光孔径几乎不再变化。 $1\ \text{ms}$  后,两液体完全静止,如图 6(c)。根据通光孔径变化初步判断  $36\ \text{V}$  电压下衰减器的响应时间是  $0.1\ \text{ms}$ 。

再看图 7,由初始状态施加  $36\ \text{V}$  电压, $0.1\ \text{ms}$  后通光孔径保持  $1.34\ \text{mm}$  不再变化;施加  $20\ \text{V}$  电压时,通光孔径由初始状态缩小至  $3.28\ \text{mm}$  稳定态所需时间也是  $0.1\ \text{ms}$ 。且由曲线变化趋势看,由于液体启动后初始速度很快,所以通光孔径初始变化很快,但在接近液体稳定位置时流速很慢,所以通光

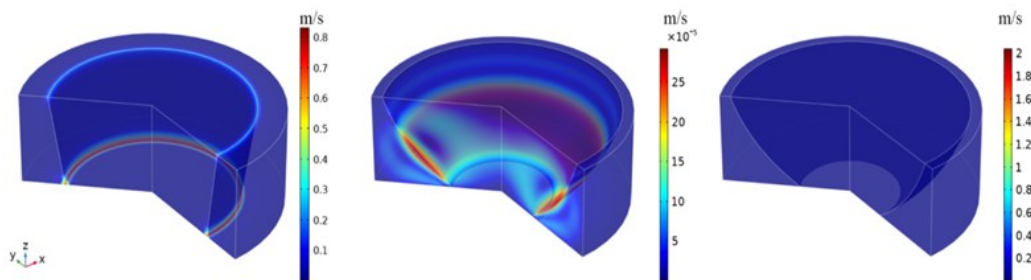
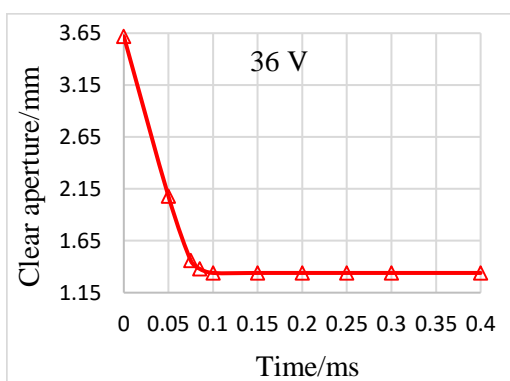
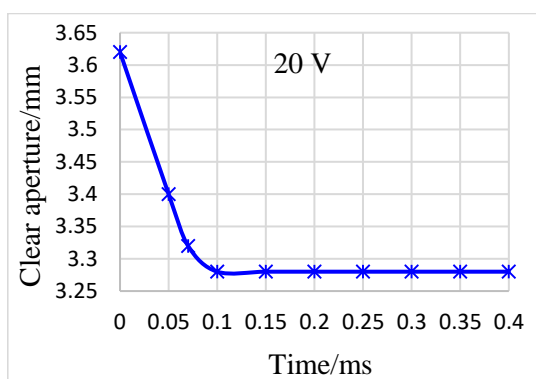


图6 36V电压下不同时间的流速分布图,对应时刻:(a) 0.01 ms; (b) 0.1 ms; (c) 1 ms

Fig. 6 Fluid rate distribution for different time at 36 V: (a) 0.01 ms; (b) 0.1 ms; (c) 1 ms



(a)



(b)

图7 通光孔径随时间的变化,电压:(a) 36 V; (b) 20 V

Fig.7 Clear aperture change with time, voltage:(a)36 V;(b)20 V

孔径变化缓慢,可见衰减器响应时间主要耗在液体运动末期稳定期,所以 36 V、20 V 以及其它电压下由初始孔径缩小至对应新孔径的响应时间都在 0.1 ms 左右。故基于液体光阑的微流控可变光衰减器阵列的响应时间为 0.1 ms。

综合考虑液体光阑的腔、液体、透明导电层等材料的吸收和漫反射损耗,光束全通状态下微流控光衰减器阵列的插入损耗可由以下公式(7)计算得到。当输入光功率为 1 mW 时,由 COMSOL 软件仿

真得到光输出功率为 0.942 mW,则光束全通状态下的插入损耗为 0.26 dB。实际衰减量应再加上插入损耗。所提 VOA 阵列与其它典型 VOA 的性能如表 1 所示。

$$IL = -10Lg\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (7)$$

其中,IL 为插入损耗, $P_0$  为输入光功率, $P_1$  为光束全通状态下的输出功率。

表 1 VOA 性能比较

Table 1 Performance comparison of VOAs

VOA/VOA array	Attenuation range	Response time	Insertion loss	Polarization sensitivity
Thermo-optical VOA [5]	0~6.99 dB	0.18 ms	/	Yes
MEMS VOA [6]	0~60 dB	3 ms	0.5 dB	No
Liquid crystal VOA array [7]	0~7.5 dB	/	0.8 dB	Yes
Planar waveguide VOA array [8]	0~30 dB	/	0.7 dB	Yes
Microfluidic VOA [16]	0~26 dB	/	/	No
VOA array in this paper	0 ~ 100%	0.1 ms	0.26 dB	No

### 3 结论

基于微流控光学和光通信技术,本文提出一种基于液体光阑的微流控 VOA 阵列,具有结构紧凑、体积小、操作方便、成本低的优点,且电控方式允许网络远程操作。所提微流控 VOA 阵列也可兼作光开关阵列。文中分别讨论了基于螺旋轨道的同步非等量衰减的 VOA 阵列与基于环形轨道的同步等量衰减的 VOA 阵列的工作特性。研究表明:基于液体光阑的微流控 VOA 阵列的衰减范围超越一般 VOA,可在 0 - 100% 范围内动态衰减,且插入损

耗小(0.26 dB),对偏振不敏感,响应时间为0.1 ms。所提VOA阵列展示了集成和高性能潜力,并为应用提供一种经济有效的方式。然而微流控器件是小型器件,因而所提基于液体光阑的微流控VOA阵列不能做超大矩阵,这是它的局限性。

## References

- [1] Chen M H, Gao F. Fabrication of a continuously adjustable bench optical attenuator [J]. *Communication World* (程木海, 高枫. 一种连续可调台式光衰减器的制作 [J]. *通讯世界*), 2022, **29**(11): 190-192.
- [2] Sun S Q, Niu D H, Sun Y, *et al.* Design and fabrication of all-polymer thermo-optic variable optical attenuator with low power consumption [J]. *Applied Physics*, 2017, **123**(10): 307-312.
- [3] Xu Z Q, Sun Q, Kan X T, *et al.* Research and application of a novel adjustable optical attenuator in lithography system [J]. *Journal of Laser* (徐子奇, 孙琪, 阚晓婷, 等. 一种新型可调光衰减器在光刻系统中的研究与应用 [J]. *激光杂志*), 2018, **39**(11): 4-9.
- [4] Song X J. Photon pulse neuron weight device—the development of adjustable optical attenuator [D]. Beijing Jiaotong University, 2017. (宋晓佳. 光子脉冲神经元权重器件—可调光衰减器的研制 [D]. 北京交通大学, 2017.)
- [5] Yin Y, Yao M, Ding Y, *et al.* Polymer/Silica Hybrid Waveguide Thermo-Optic VOA Covering O-Band [J]. *Micromachines*, 2022, **13**(4): 511.
- [6] Liu B, Lei J, Zhong C J, *et al.* Design of a variable optical attenuator based on the STM 32 [J]. *Guangdong Communication Technology* (刘斌, 雷静, 钟昌锦, 等. 基于STM 32的可变光衰减器的设计 [J]. *广东通信技术*), 2020, **40**(10): 48-52.
- [7] Hirabayashi K., Wada M., and Amano C. Optical-fiber variable-attenuator arrays using polymer-network liquid crystal [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(5): 487-489.
- [8] Mei-Zhen Ren, Jia-Shun Zhang, Jun-Ming An, *et al.* Low power consumption 4-channel variable optical attenuator array based on planar lightwave circuit technique [J]. *Chinese Physics B*, 2017, **26**(7): 074221.
- [9] Jiukai Tang, Guangyu Qiu, and Jing Wang. Recent Development of Optofluidics for Imaging and Sensing Applications [J]. *Chemosensors*, 2022, **10**(15).
- [10] Yan R, Cheng K H, Pham R, *et al.* Distinct condensation droplet distribution patterns under low-and high-frequency electrowetting-on-dielectric (EWOD) effect [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, **169**: 123269.
- [11] Song X., Zhang H., Li D., *et al.* Electrowetting lens with large aperture and focal length tunability [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 1-12.
- [12] Clement C. E., Thio S. K., and Park S.-Y. An optofluidic tunable Fresnel lens for spatial focal control based on electrowetting-on-dielectric (EWOD) [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, **240**: 909-915.
- [13] Joshi K., Velasco V., and Esfandyarpour R. A Low-Cost, Disposable and Portable Inkjet-Printed Biochip for the Developing World [J]. *Sensors*, 2020, **20**(12): 3593.
- [14] Xiong L L, Liao Q K, Lin S L, *et al.* Defect Detection of Electrowetting Display Based on Histogram Gradient Weighting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (熊铃铃, 廖钦楷, 林珊玲, 等. 基于直方图梯度加权的电润湿显示器缺陷检测 [J]. *激光与光电子学进展*), 2021, **58**(12): 86-94.
- [15] Günther S., Endrödy C., Si S., *et al.* EWOD system designed for optical switching [C]//2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS, 2017: 1329-1332.
- [16] Dudus A., Blue R., and Uttamchandani D. Single-mode fiber variable optical attenuator based on a ferrofluid shutter [J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(8): 969-973.
- [17] Janzen J. The refractive index of colloidal carbon [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1979, **69**(3): 436-447.
- [18] Li L Y, Yuan R Y, Wang J H, *et al.* Optofluidic lens based on electrowetting liquid piston [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 13062.
- [19] Vasudev A. A Capillary Force Microgripper for Microassembly Using Electrowetting-on-Dielectric (EWOD) [D]. Akron, USA: University of Akron, 2009: 67.
- [20] Hassani A., and Skorobogatiy M. Design criteria for microstructured-optical-fiber-based surface-plasmon-resonance sensors [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, **24**(6): 1423-1429.