



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111229345 B

(45) 授权公告日 2021.01.15

(21) 申请号 202010073978.6

(22) 申请日 2020.01.22

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111229345 A

(43) 申请公布日 2020.06.05

(73) 专利权人 浙江大学  
地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 张磊 张璋

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公司 33200

代理人 陈昱彤

(51) Int. Cl.

B01L 3/00 (2006.01)

G01P 5/26 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 107014411 A, 2017.08.04

CN 107110882 A, 2017.08.29

CN 110554211 A, 2019.12.10

CN 104345015 A, 2015.02.11

US 2019146002 A1, 2019.05.16

CN 1675537 A, 2005.09.28

CN 106645793 A, 2017.05.10

CN 104950133 A, 2015.09.30

CN 109374923 A, 2019.02.22

US 2003059150 A1, 2003.03.27

审查员 朱芳萍

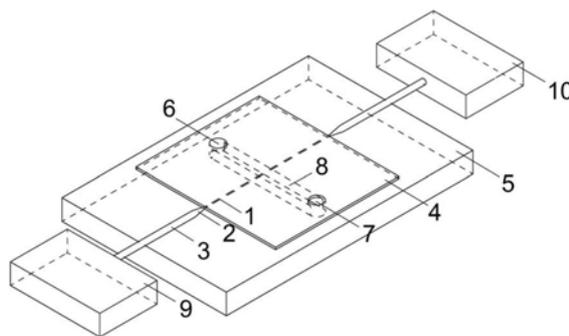
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器

(57) 摘要

本发明公开了一种基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器,包括微流控芯片、微纳光纤和柔性薄膜,柔性薄膜的厚度小于等于 $100\mu\text{m}$ ,所述柔性薄膜的折射率小于微纳光纤的折射率;柔性薄膜包覆微流控芯片的流体通道,并且柔性薄膜在流体通道的入口和出口处分别设有开口,流体通道的待测位置处有微纳光纤的拉伸部分横跨流体通道,微纳光纤的拉伸部分、拉锥过渡区以及两端未拉伸部分的局部包埋于柔性薄膜内。当流体通道中流体流动时,柔性薄膜受到压力向外弯曲,由于微纳光纤的弯曲损耗的增加,输出光强信号随之变小,从而实现流速传感。本发明可以实现多点流速探测,并能对已存在的微流控芯片进行流速探测,实现高灵敏度的流速传感。



1. 一种基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器,其特征是:包括微流控芯片、微纳光纤和柔性薄膜,柔性薄膜的厚度小于等于 $100\mu\text{m}$ ,所述柔性薄膜的折射率小于微纳光纤的折射率;柔性薄膜包覆微流控芯片的流体通道,并且柔性薄膜在流体通道的入口和出口处分别设有开口,流体通道的待测位置处有微纳光纤的拉伸部分横跨流体通道,微纳光纤的拉伸部分、拉锥过渡区以及两端未拉伸部分的局部包埋于柔性薄膜内。

2. 根据权利要求1所述的微流控芯片流速传感器,其特征是:还包括光源和探测器,微纳光纤的一端的未拉伸部分与光源连接、另一端的未拉伸部分与探测器连接。

## 一种基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种微流控芯片的流速测量装置,属于光纤传感领域。

### 背景技术

[0002] 在过去的几十年中,在流体物理学、微反应器、生物激光技术等领域中,微流控技术已经成为了相关科学研究的重要平台。在上述领域的研究中,通常需要对微流进行精确的测量与控制,这使得人们对高精度、多功能的微流控芯片流速传感器的需求越来越高。目前,多采用结构复杂、集成度高的微流控芯片流速传感器以实现微流的高灵敏探测,但是复杂结构的加工需要精密的仪器,增加了芯片的成本;同时复杂结构也会污染样品,干扰微流。因此,如何实现结构简单的高精度微流控芯片流速传感器,成为了最近的研究热点。

[0003] 目前使用的微流控芯片流速传感器一般通过检测热传递、悬臂梁的形变或流体对管壁的压力来实现对流速变化的传感。热传递法通过在通道内相隔一段距离放置热源和热传感器,二者之间热传递的速度与流速有关,通过检测传感点的温度便可以获得此时通道内的流速。热传递法测量流速可以实现高灵敏度的温度传感,但是在测量中需要较长的时间达到热平衡,响应时间较长。使用悬臂梁的流速传感器通过在流体通道中加工悬臂梁结构,流体流经悬臂梁时会对其产生推力使其发生形变,以此可以通过检测悬臂梁的形变来实现对流速变化的传感。但是悬臂梁侵入式的设计使得流体通道的构型变得复杂,流体的流动受到干扰,侵入式的传感元件也容易受到污染。与之相比,检测流体对管壁的压力不需要加工额外的结构,非侵入式的结构使得通道构型无需改变,避免了流体和传感元件的相互干扰,显示出了对于流速的高精度测量的应用潜力。但是压力的变化量通常非常小,如何精确测量管壁受到的压力,成为了该方法面临的最大问题。

[0004] 微纳光纤是一种直径与传播光波长接近或更小的新型光纤,其直径通常在500 nm至5  $\mu\text{m}$ 。微纳光纤多由标准通信光纤加热拉伸制备,微纳光纤两端的未拉伸部分为标准光纤,易与外部光源和检测器集成。自从2003年童利民等首次演示了亚波长直径的微纳光纤的低损耗导光特性以来,微纳光纤在近场光学、非线性光学、表面等离子激元、微纳光器件等领域的研究备受关注,其中微纳光纤传感器是研究最多的方向之一。由于微纳光纤具有亚波长级的直径,所以光在微纳光纤中传输时,会有很大一部分光以倏逝场的形式在微纳光纤的外部进行传播,因此微纳光纤的光场对外部环境的变化特别敏感。这使得微纳光纤在小尺度、高灵敏度的传感器的制备上具有一定的优势。同时,使用聚合物包埋微纳光纤,聚合物的折射率应略小于微纳光纤;聚合物的包埋有效增大了倏逝场的比例,使光场对于外部环境的变化更加敏感,同时聚合物还可以显著提高微纳光纤的稳定性,使其免受外界环境因素的干扰。这些特性为制备高灵敏度、微型化的微流控芯片流速传感器提供了可能。在聚合物的包埋下,微纳光纤还获得了良好的机械性能,弯曲半径可以小至微米量级,拉伸性能也得到了提升。

[0005] 因此,研究一种非侵入式、多功能的微流控芯片流速传感器对于流体物理学、细胞生物学,微反应器、生物激光技术等领域的研究和发展具有重要意义。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器。

[0007] 为实现上述目的,本发明所采取的技术方案是:本发明基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器包括微流控芯片、微纳光纤和柔性薄膜,柔性薄膜的厚度小于等于 $100\mu\text{m}$ ,所述柔性薄膜的折射率小于微纳光纤的折射率;柔性薄膜包覆微流控芯片的流体通道,并且柔性薄膜在流体通道的入口和出口处分别设有开口,流体通道的待测位置处有微纳光纤的拉伸部分横跨流体通道,微纳光纤的拉伸部分、拉锥过渡区以及两端未拉伸部分的局部包埋于柔性薄膜内。

[0008] 进一步地,本发明还包括光源和探测器,微纳光纤的一端的未拉伸部分与光源连接、另一端的未拉伸部分与探测器连接。

[0009] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:(1)本发明通过将柔性薄膜包覆微流控芯片的流体通道,并在流体通道的入口和出口处分别设有开口,并使微纳光纤的拉伸部分横跨待测流体通道的待测位置,当流体通道中流体流动时,柔性薄膜受到压力向外弯曲,由于微纳光纤的弯曲损耗的增加,输出光强信号随之变小,从而实现流速传感。由此,本发明传感器对微流控芯片的流速进行测量时,不需要改变微流控芯片的流体通道的原本构型,从而通过这种非侵入性的测量方式避免了对微流控芯片的流体通道内流体的干扰以及对微纳光纤、柔性薄膜等元件的污染。(2)由于本发明传感器无需改变微流控芯片的流体通道的原本构型,因此可以适用于任意结构的微流控芯片上,可以对已存在的微流控芯片进行流速测量,适用广泛。(3)对于具有多个流体通道的微流控芯片,由于各待测流体通道的待测位置上均有微纳光纤的拉伸部分横跨,由此可以实现微流控芯片的多传感点的流速测量。(4)由于本发明传感器由光驱动,不会受到电磁干扰,不会产生漏电、短路等安全隐患,安全性较高。(5)由于微纳光纤包埋于柔性材料中,微纳光纤可以免受外界环境因素的干扰,使得本发明具有良好的稳定性,机械强度和抗电磁干扰能力。

## 附图说明

[0010] 图1是本发明基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器的一种实施方式(单个流体通道)的结构示意图;

[0011] 图2是图1的正视图;

[0012] 图3是图2的左视图;

[0013] 图4是图2的俯视图;

[0014] 图5是图1所示的微流控芯片流速传感器的工作曲线;

[0015] 图6是本发明基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器的另一种实施方式(多个流体通道)的结构示意图;

[0016] 图7是图6所示的多通道微流控芯片流速传感器的工作曲线;

[0017] 图中,1-微纳光纤的拉伸部分,2-微纳光纤的拉锥过渡区,3-微纳光纤的未拉伸部分,4-柔性薄膜,5-单通道微流控芯片,6-流体通道的入口,7-流体通道的出口,8-流体通道,9-光源,10-探测器,11-多通道微流控芯片。

## 具体实施方式

[0018] 如图1至图4示出了本发明的基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器的一种实施方式,它包括单通道微流控芯片5、微纳光纤和柔性薄膜4,柔性薄膜4的厚度小于等于100 $\mu$ m,柔性薄膜4的折射率小于微纳光纤的折射率;柔性薄膜4包覆微流控芯片的流体通道8,并且柔性薄膜4在流体通道8的入口和出口处分别设有开口;微流控芯片的流体通道的待测位置处有微纳光纤的拉伸部分1横跨此处的流体通道,使得微纳光纤的拉伸部分1两端的拉锥过渡区2分别置于待测位置所在的流体通道的两侧。微纳光纤的拉伸部分1、拉锥过渡区2以及两端未拉伸部分3的局部包埋于柔性薄膜4内。

[0019] 以下以单通道微流控芯片流速传感器为例说明本发明微纳光纤微流控芯片流速传感器的结构和制备方法。

[0020] 因为二氧化硅微纳光纤的折射率约为1.45,为使经过柔性材料包埋之后,微纳光纤的外围产生更大比例的倏逝场,有利于获得更高的传感灵敏度,优选方案是使柔性材料的折射率大于空气的折射率。此外,若柔性材料的折射率高于微纳光纤的折射率,则光线不能被约束在微纳光纤内部和外围传播,无法实现传感的功能。为此,本发明中的柔性材料的折射率小于微纳光纤的折射率,本实施例中的柔性薄膜则采用折射率约为1.40的PDMS。

[0021] 将未固化的PDMS浇筑在玻璃载玻片上,使用台式匀胶机以1200转/分的速度匀胶1分钟,在85 $^{\circ}$ C的温度下固化30分钟,然后将其与载玻片剥离,形成表面光滑,厚度约为60 $\mu$ m的PDMS柔性薄膜4。将制备得到的PDMS柔性薄膜4粘合到微流控芯片5上以密封凹槽,形成微流控芯片5的流体通道,并且柔性薄膜4在流体通道8的入口6和出口7处分别设有开口。

[0022] 使用加热拉伸法制备得到拉伸区域直径小于2 $\mu$ m的微纳光纤,将其水平放置在PDMS柔性薄膜4上,如图1所示,微纳光纤的拉伸部分1、拉锥过渡区2以及未拉伸部分3的局部均应置于PDMS柔性薄膜4上,微纳光纤的拉伸部分1位于流体通道8的正上方并在待测位置处横跨流体通道8,使得微纳光纤拉伸区域1两端的拉锥过渡区2分别置于待测流体通道的两侧。然后在PDMS柔性薄膜4上面刷涂少量未固化的PDMS,85 $^{\circ}$ C的温度下固化30分钟,使微纳光纤的拉伸部分1、拉锥过渡区2以及微纳光纤的未拉伸部分3的局部全部包埋在PDMS薄膜中,形成本发明的基于微纳光纤的单通道微流控芯片流速传感器。

[0023] 图6示出了本发明基于微纳光纤的微流控芯片流速传感器的另一种实施方式(一种多通道微流控芯片流速传感器),它包括多通道微流控芯片11、微纳光纤和柔性薄膜4,柔性薄膜4的厚度小于等于100 $\mu$ m,柔性薄膜4的折射率小于微纳光纤的折射率;柔性薄膜4包覆微流控芯片的流体通道8,流体通道8有多个支通道,并且柔性薄膜4在流体通道8的入口6和各出口7处分别设有开口。在图6所示的实施例中,微流控芯片的三个待测位置分别位于三个支通道上,为此,在这三个支通道的待测位置处各有一根微纳光纤的拉伸部分1横跨支通道,使得每根微纳光纤的拉伸部分1两端的拉锥过渡区2分别位于待测位置所在的支通道的两侧。微纳光纤的拉伸部分1、拉锥过渡区2以及微纳光纤的两端未拉伸部分3的局部包埋于柔性薄膜4内。

[0024] 以下以多通道微流控芯片流速传感器为例说明本发明微纳光纤微流控芯片流速传感器的结构和制备方法。

[0025] 将前述柔性薄膜4(PDMS薄膜)粘合到多通道微流控芯片11上以密封凹槽,形成流体通道8,并且柔性薄膜4在流体通道8的入口6和各出口7处分别设有开口。控制三根微纳光

纤,依次将各拉伸好的微纳光纤分别水平放置在柔性薄膜4上的三个待测位置处,每根微纳光纤的拉伸部分1、拉锥过渡区2以及未拉伸部分3的局部均应置于柔性薄膜4上,各有一根微纳光纤的拉伸部分1位于流体通道8的三个支通道的待测位置的正上方并横跨这三个支通道,使得每根微纳光纤的拉伸部分1两端的拉锥过渡区2分别位于待测位置所在的支通道的两侧。然后在PDMS柔性薄膜4上面刷涂少量未固化的PDMS,85℃的温度下固化30分钟,使微纳光纤的拉伸部分1、拉锥过渡区2以及微纳光纤的未拉伸部分3的局部全部包埋在PDMS薄膜中,形成本发明的基于微纳光纤的多通道微流控芯片。

[0026] 本发明微流控芯片流速传感器还可进一步包括光源9和探测器10,每根微纳光纤的一端的未拉伸部分3各与一个光源9连接、另一端的未拉伸部分3各与一个探测器10(如光谱仪、CCD相机等)连接。作为本发明的另一种实施方式,也可以各微纳光纤的一端的未拉伸部分3与同一个光源9连接、另一端的未拉伸部分3与同一个探测器10(如CCD相机)连接。

[0027] 如图1所示,将微纳光纤的一端未包埋于柔性薄膜4的未拉伸部分3通过标准光纤适配器与光源9连接,将微纳光纤的另一端未包埋于柔性薄膜4的未拉伸部分3通过标准光纤适配器与探测器10连接,将流体通道8的入口6与注射泵相连,流体通道8的出口7与废液缸相连。

[0028] 图5为单通道微流控芯片流速传感器的工作曲线。注射泵将水以一定速度推进到流体通道8中,对流体通道8的外壁产生向外的压力,压力的大小与流体的流速呈正相关,柔性薄膜4受到压力向外弯曲,微纳光纤随之弯曲,损耗增大,透过率下降。通过检测输出光强信号的变化,实现流速传感。

[0029] 当流速为0时,得到最大透射光强。随着流速的增大,流体通道8内的压强增大,柔性薄膜4向外鼓胀,使微纳光纤发生弯曲,透射光强下降。通过注射泵控制流体通道8中流体的流速,初始流速为0,每隔30秒开启或暂停一次注射泵,每次开启后的流速比前一次增加10 $\mu$ L/min,直到流速达到100 $\mu$ L/min。以时间为横坐标,透过率为纵坐标,微流控芯片流速传感器对于流速变化的响应如图5所示。由图5可以看到,随着流速的不断增大,光纤的透过率不断下降,光纤透过率与流速的变化近似满足线性的关系,用光源稳定性的3倍标准偏差计算,该微流控芯片流速传感器的检测灵敏度可达0.78 $\mu$ L/min。

[0030] 图6所示的是基于本发明的多通道微流控芯片流速传感器。如图6所示,各根微纳光纤的两端未拉伸部分3分别通过标准光纤适配器与钨灯(光源9)和光谱仪(探测器10)相连。流体入口6与注射泵相连,注射泵将水以一定速度推进流体通道8,各支通道的待测点处的柔性薄膜4收到向外的压力,向外弯曲,微纳光纤随之弯曲,损耗增大,透过率下降。通过检测各根微纳光纤输出光强信号的变化,实现多点的流速传感。

[0031] 图7为图6中的多通道微流控芯片流速传感器的工作曲线。注射泵将水以一定速度推进到流体通道8中,对流体通道8的外壁产生向外的压力,压力的大小与流体的流速呈正相关,柔性薄膜4受到压力向外弯曲,微纳光纤随之弯曲,损耗增大,透过率下降。图6中,由左到右的三根微纳光纤的拉伸部分1与流体通道8的三个待测位置所在的支通道的相交位置分别对应微流控芯片上的三个待测位置所在的支通道的各待测点V1、V2、V3。通过检测各根微纳光纤输出光强信号的变化,实现流速传感。

[0032] 当流速为0时,得到最大透射光强。随着流速的增大,流体通道内压强增大,柔性薄膜4向外鼓胀,使微纳光纤发生弯曲,透射光强下降。通过注射泵控制流体通道8中的流速,

初始流速为0,每次增加50 $\mu$ L/min。以流体入口6处的流速为横坐标,光纤的透过率为纵坐标,三个待测点V1、V2、V3处的微纳光纤的透过率对于流速变化的响应如图7所示。由图7可以看到,随着流速的不断增加,三个待测点V1、V2、V3处的微纳光纤均显示出透过率的下降,在流体入口6处的流速相同时,各待测点的流速 $V1 > V2 > V3$ ,因此,V1处光纤的透过率最低,V3处光纤的透过率最高,光纤透过率与流速的变化近似满足线性的关系。由此可见,本发明的多通道微流控芯片流速传感器可以实现对微流控芯片中流体通道8的多个待测点处的实时流速测量。

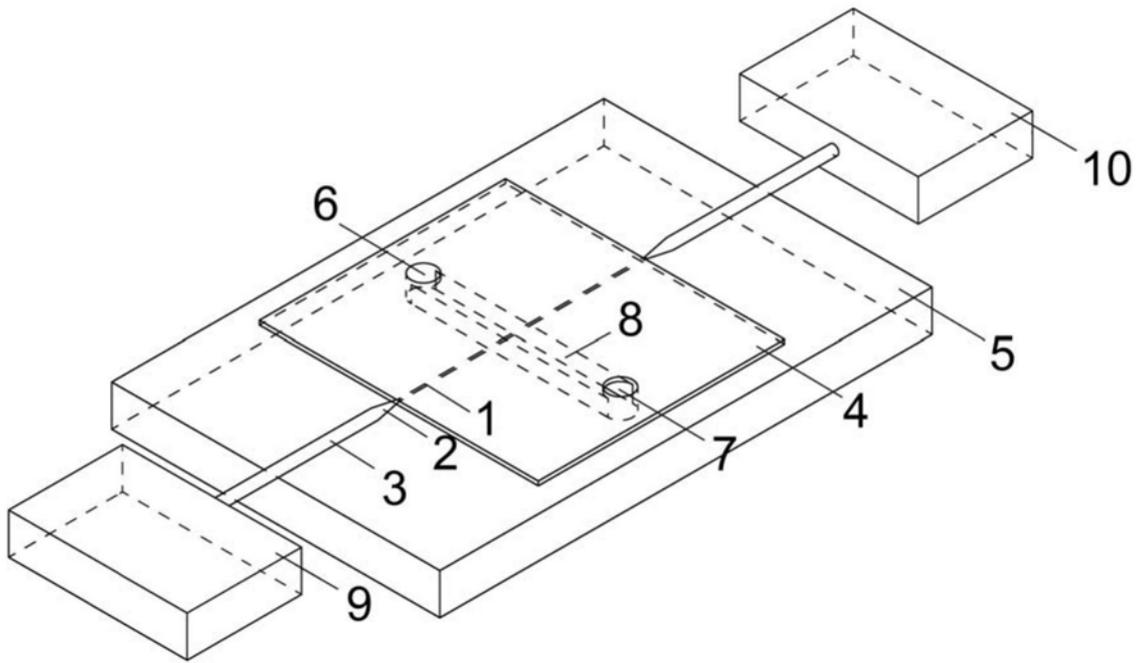


图1

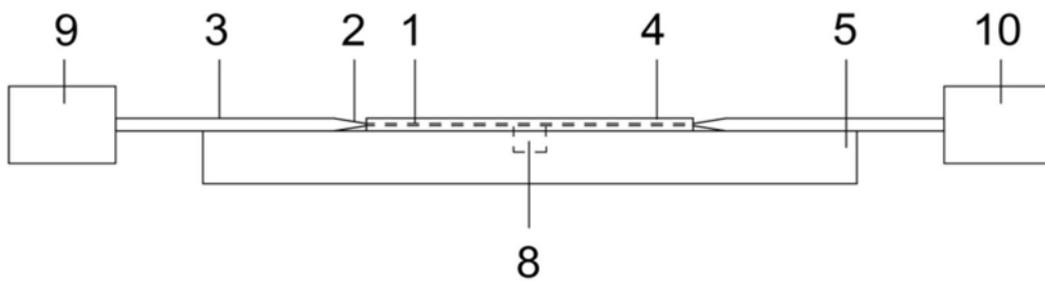


图2

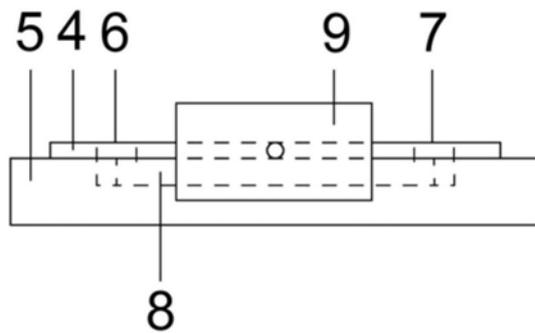


图3

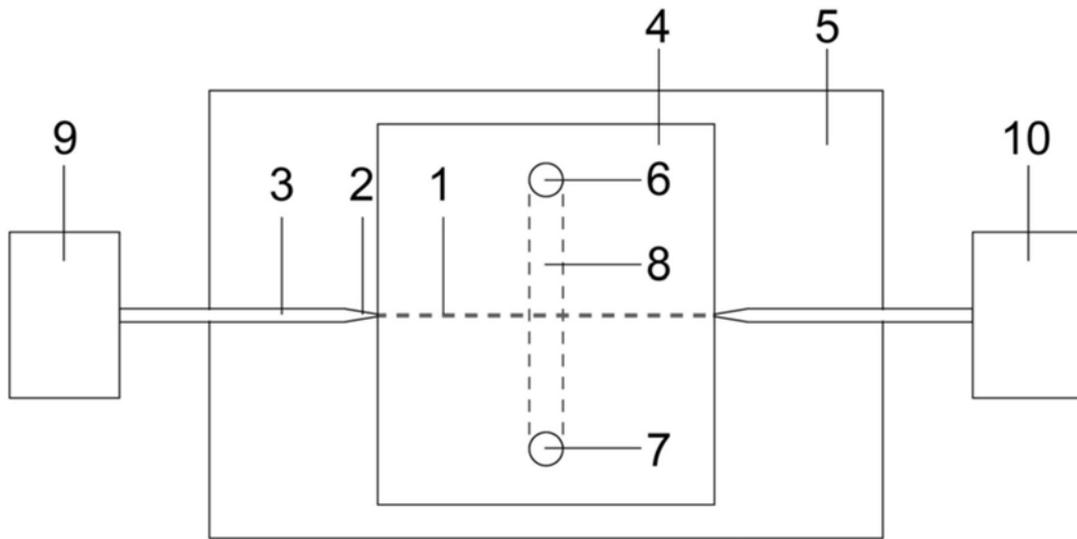


图4

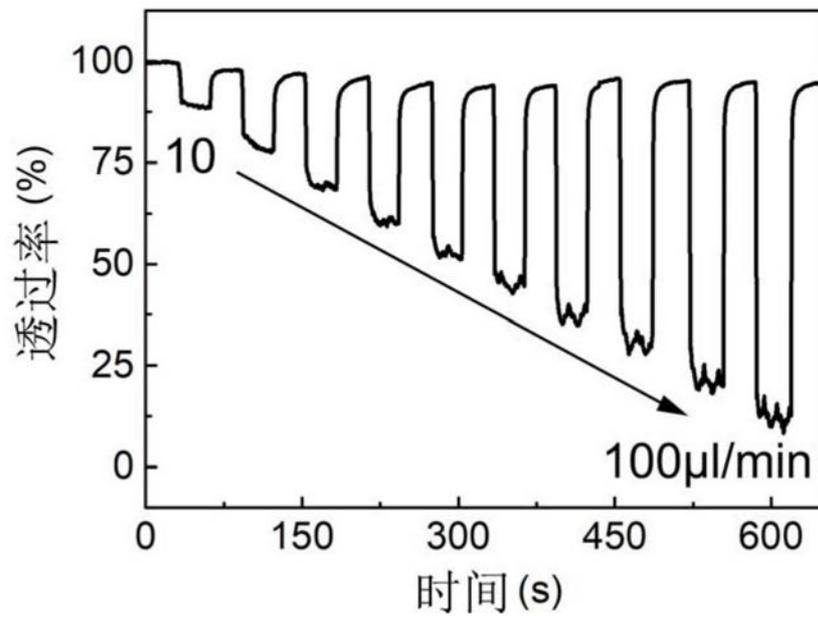


图5

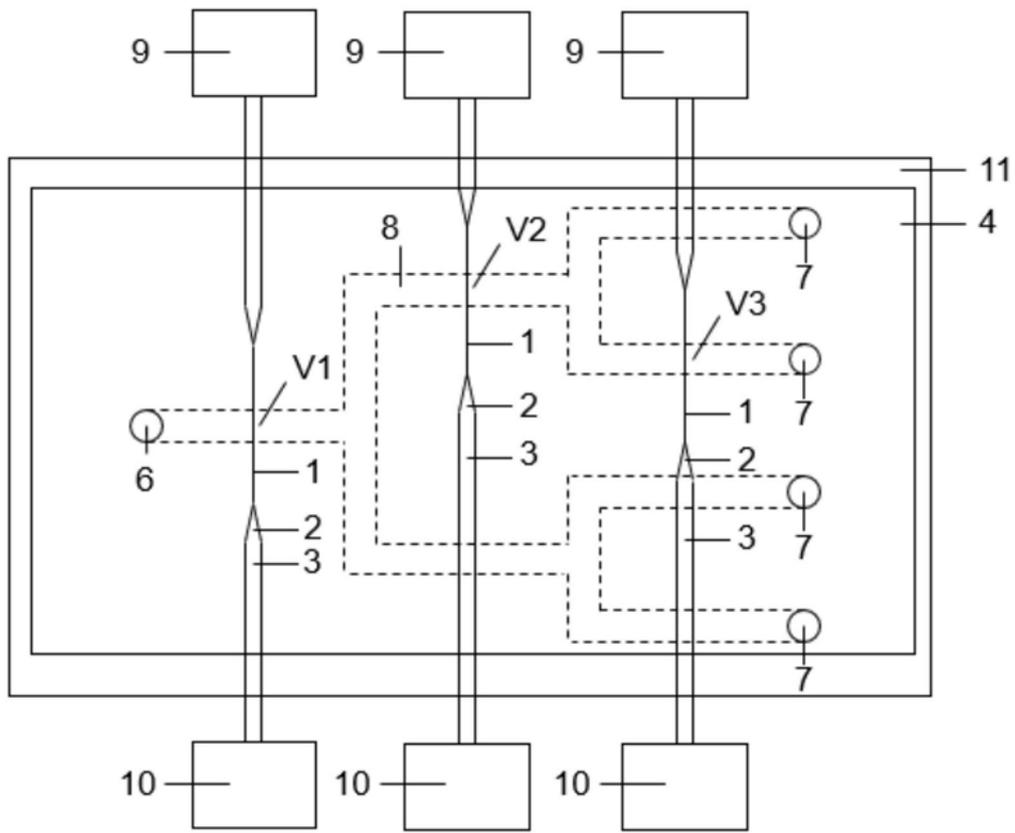


图6

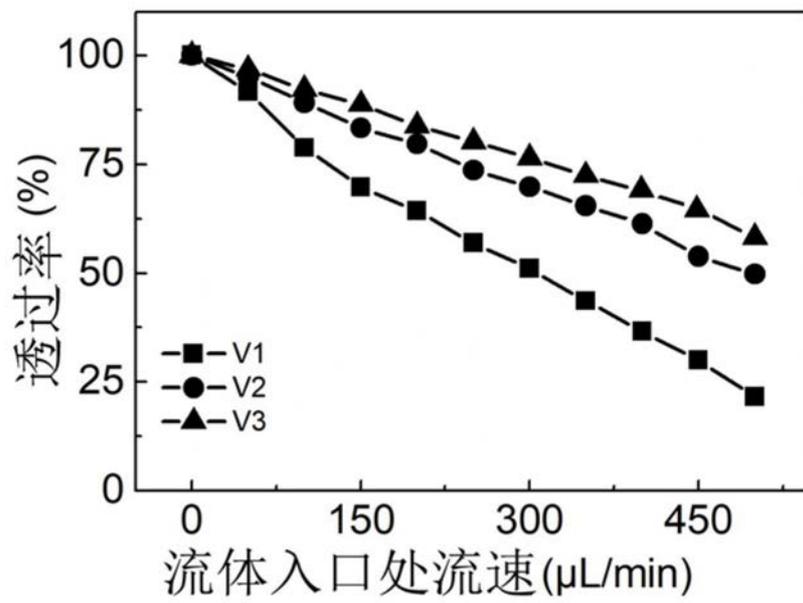


图7