

光流控传感器及其应用

朱晓强, 梁莉, 史阳, 杨奕

武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072

摘要 基于光流控技术, 通过设计不同的芯片结构, 可以制造出性能优异的光流控传感器。根据光流控传感器的芯片结构, 可以将其分为4大类: 前2类为基于光子晶体谐振腔的光流控传感器和基于回音壁模式的光流控传感器, 流体在流经这2种传感器中的腔体结构时, 产生的折射率改变会引起腔体耦合模式的变化, 从而使光响应信号产生改变, 起到传感作用; 第3类为基于光波导模式的光流控传感器, 光在波导中全反射产生的倏逝场会与流体发生相互作用, 令光信号产生变化; 第4类为基于表面等离子体共振的光流控传感器, 它利用表面等离子共振对金属表面区域折射率的敏感性实现传感功能, 流体带来的折射率变化会令共振峰发生偏移。本文综述了以上4类光流控传感器芯片的结构、原理及应用。光流控传感器对于微小的折射率变化十分敏感, 具有很高的灵敏度和精准度, 同时, 光流控系统本身具有低成本、小型化、结构简洁及实时调控的特征。随着未来被探测物体趋于微观, 光流控传感器在物质探测和生物物质探测领域将发挥越来越强大的作用。

关键词 光流控; 传感器; 物质探测; 生化检测

光流控学是一门综合了微流控学和光子学优势的新兴交叉学科^[1-2]。传统的微流控仅控制流体, 而光流控除此之外同时对光进行控制, 具有更高的操纵维度。光流控将微流和光学器件有机结合, 两个部分互相影响, 促生出非常强大的功能。因此, 光流控学一经提出, 便获得广泛关注, 领域研究活跃, 发展迅速^[3-4]。流体是光流控系统中的重要载体, 可以携带运输各种微纳尺度级的物质通过光流控系统。光同流体及流体携带物质的相互作用, 产生特定的光信号响应, 基于此可以实现快速高效的检测。光流控芯片可以将传统检

测学中复杂的化验过程缩小为1 cm量级, 从而实现检测的小型化。同时, 其核心是利用光学结构对折射率的敏感度进行检测, 具有较高的敏感度和精准度。这些特性使得光流控传感器广泛应用于环境检测^[5-6]及生化传感领域^[7-8]。

利用光流控技术, 通过流体对光的控制, 可以实现很多诸如塔尔博特、离散衍射等经典的光学现象^[9-11], 以及光学隐身衣^[12]、光学转角器^[13]、光束分离器^[14]、光流控开关^[15]、光流控波导^[16]、光流控光纤^[17]等应用。此外, 通过光及光学系统对流体的控制, 可以实现如粒子分

收稿日期: 2018-07-01; 修回日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11774274, 61378093); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(QNLM2016ORP0410); 深圳市科技计划项目(JCYJ20170818112939064); 国家海洋局海洋环境监测与升级项目

作者简介: 朱晓强, 博士研究生, 研究方向为光流控芯片的设计与实现, 电子信箱: daveria@whu.edu.cn; 杨奕(通信作者), 教授, 研究方向为光流控芯片设计与实现及光流空芯片在生化传感器和环境中的应用, 电子信箱: yangyiys@whu.edu.cn

引用格式: 朱晓强, 梁莉, 史阳, 等. 光流控传感器及其应用[J]. 科技导报, 2018, 36(16): 20-28; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.16.002

离^[18]、光镊^[19-20]、光微流阀^[21-22]、光微流泵^[23-24]等应用。通过光流控实现的应用可以看出,在光流控系统中,折射率的变化可以对光的传播产生很大的影响。而利用这一特性,可以将光流控系统利用到物质探测和生化传感领域,制成光流控传感器^[25]。光流控芯片的尺寸量级为厘米量级,而其中的沟道宽度通常只有几百微米,这意味着,仅用很少的样品量,便可以在光流控传感器中实现相应的分析和检测。另外,在光流控芯片中加入特定的光学结构后,可以令光产生谐振效应。此时光对系统中折射率的细微变化可以产生较大的响应,如特征波长的偏移,这使得光流控传感器具有很高的敏感度和精准度。光流控芯片采用软刻蚀工艺,使芯片具有较低的成本。此外,流体是各种微纳尺度粒子(包括化学大分子及生物分子)的天然载体,这些粒子可以随着流体直接流入光流控传感器中被分析和检测,一些传统检测中的复杂过程可以由一个光流控系统直接完成。这些特征使得光流控传感器具备高集成度、低成本的优势,同时其探测的敏感度强、精准度高,在物

质检测和生化分析方面拥有巨大的潜力。

本文从光流控传感器的结构和原理入手,介绍不同类型的光流控传感器,同时阐述其特性及相应的应用。

1 基于光子晶体谐振腔的光流控传感器

在生化传感器领域中,高敏感性、低成本、高精度的传感器一直是其领域内的追求。光子晶体谐振腔具有小巧而紧凑的结构特征,对光具有高度敏感性,使其适用于生化传感领域。光子晶体谐振腔具有较高的集成度,与光流控系统相结合时,其腔内的折射率由通过的流体决定。当流体发生变化,或者流体中携带的物质发生变化时,其腔内的折射率会发生相应改变,从而导致谐振状态的变化。这种变化对折射率十分敏感,因此基于光子晶体谐振腔的光流控传感器(图1)被广泛地应用于气体浓度测量、液体浓度测量和生物物质浓度的测量中^[26]。

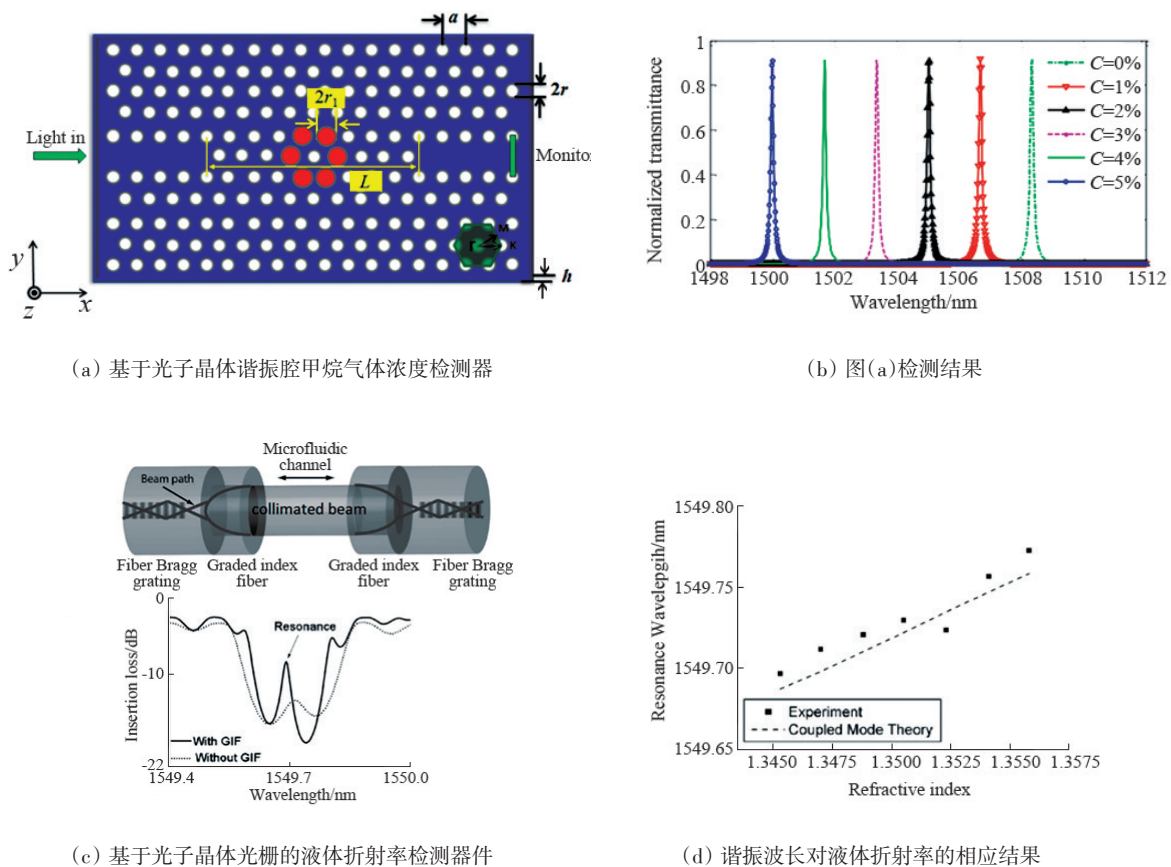


图1 基于光子晶体谐振腔的光流控传感器应用

Fig. 1 Optofluidic sensors based on photonic crystal cavity

1.1 光子晶体谐振腔的基本原理

光子晶体谐振腔通常是在高折射率的电介质材料上制造出的周期性孔洞结构。光在这样的结构中传播时,会发生复杂的折射和反射。产生的折射光和反射光经过一系列干涉作用后,导致只有特定波长的光才能通过该结构,形成光子带隙^[27]。此时,一个腔内折射率的微小扰动即可使光子晶体谐振腔的带隙发生偏移^[28]。偏移频率的表达式可以根据电磁微扰理论得出^[29],具体为

$$\Delta\omega = -\frac{\omega}{2} \frac{\langle E|\Delta\varepsilon|E\rangle}{\langle E|\varepsilon|E\rangle} = -\frac{\omega}{2} \frac{\Delta n}{n} f \quad (1)$$

其中, ω 和 $\Delta\omega$ 分别表示频率及其偏移量; ε 和 $\Delta\varepsilon$ 分别表示介电常数及其偏移量; n 和 Δn 分别表示折射率及其偏移量; f 为 $[0,1]$ 之间的参数,表示在微扰区域电场能量的填充度。

式(1)可以看出,折射率的变化会直接影响光子晶体谐振腔的光子带隙,利用折射率变化对带隙偏移产生的影响,可以制造出基于光子晶体谐振腔的传感器。

1.2 光子晶体谐振腔在光流控传感器的具体应用

在光子晶体中,其谐振腔实际上就是在高折射率物质,如硅板上刻蚀出的规则孔洞,在孔洞中,流体可以随意传播。利用这一特性,通过与光流控技术的结合,可以制成检测气体或液体浓度的传感器。在一些具有有害气体的工作环境中,如矿井,随时监测有害气体的浓度是十分必要的。不同气体的折射率具有微小差异,而光子晶体对折射率的高度敏感性可以使其分辨出不同的气体。对于光流控技术下的光子晶体传感器,气体是实时流动于光流控芯片中的,因此,可以实现对气体浓度的实时检测。

Sünner 等^[30]将光子晶体的第一行孔洞嵌入到光流控波导中,实现了可以辨别真空、氮气和六氟化硫气体的光流控传感器。当折射率改变尺度为 10^{-4} 时,对于 $1.5 \mu\text{m}$ 的入射光,可以令其特征波长偏移 8 pm ,即单位折射率的敏感度为 80 nm 。在这一基础上,Zhang 等^[31]对其做了改进,使得可探测的折射率变化达到 10^{-5} ,特征波长的偏移为 51 nm 。这种将边缘孔洞集成到光流控波导中的方式对集成时的精准度要求较高,使得其在制备过程中存在较大的困难。Li 等^[32]将光子晶体孔洞的中间列打通为一个矩形孔洞,然后将其集成到光流控波导中。这种集成方式对精准度的要求较低,可以实现折射率变化为 10^{-4} 量级的探测,单位折射率变化

引起的波长偏移为 421 nm 。以上结构下的气体光流控传感器虽然可以分辨出不同的气体,但是无法针对特定的气体种类进行浓度测量。Zhang 等^[33]利用穴番 E 分子浸润光子晶体孔洞,实现了针对甲烷气体的光流控传感器(图 1(a)、图 1(b)),测量的敏感度可以达到 167.348 nm ,测量的精度可以达到 6.9735×10^{-4} 。然而,同传统的气体传感器相比,基于光子晶体谐振腔的光流控气体传感器的敏感度和测量精度仍然相对偏低。

相对于气体,液体之间的折射率差异更大,当液体通入光子晶体的孔洞时,对其带隙偏移影响更大。一些研究者通过对光子晶体的加工,制成不同的光子晶体结构,然后将其集成至光流控芯片内,实现了对液体折射率的测量^[34-37]。如将光子晶体的部分孔洞直接集成至光流控芯片中^[34],抹除环形区域(或半环形)的孔洞^[35],抹除一系列光子晶体孔洞^[36],抹除特定单个光子晶体孔洞等结构。而另一些研究者则通过采用光子晶体光纤的方式来实现对液体折射率的测量^[37]。Domachuk 等^[38]将一个法布里-珀罗(F-P)腔置于两根准直的布拉格光纤之间,令液体通过 F-P 腔进行测量,如图 1(c)、图 1(d)所示。相应地,同为一维光子晶体光纤的长周期光纤光栅亦可应用于其中^[39]。利用光子晶体光纤的情况下,若想较好地提高敏感度和精准度,令液体样品直接流过光子晶体光纤的孔洞是十分重要的。Wu 等^[40]利用一种 C 型光纤结构,令其分别置于光子晶体光纤两侧,作为液体的入口和出口。光子晶体光纤除了中心两个孔洞外,其余均被堵住。此结构具有很高的能量密度,可使敏感度提高 70% 。类似地,Zhang 等^[41]将光纤两侧的边缘剥离一部分后,用聚二甲基硅氧烷(PDMS)封住,封住的两侧打孔可以作为液体的入口和出口,此时液体在光子晶体光纤内将在被剥离的部分流动。这种方式可以令液体对腔内折射率产生充分的影响,进而制成高敏感度的液体折射率光流控传感器。

2 利用回音壁模式的光流控传感器

当微球型结构置于折射率相对较低的环境中时,在微腔内,大于临界角的光将会在微腔表面不断发生全反射,使光被束缚在微球表面。在不断沿着微腔表面传播时,若光满足一定干涉条件,就可以相互叠加增强,形成回音壁(WGM)模式。外界环境对微腔折射率的影响会导致微腔的模式发生改变,基于这一原理可

制作基于WGM模式的传感器。在光流控系统中,可在直接制作微球结构中通入液体,通过液体产生的光响应变化,检测液体携带的生化物质。此外,微球型的结构还可以通过液体直接携带产生,也可以通过两相流产生微液滴的方式产生。相比纯固体结构需要微纳加工技术,在光流控系统中,微球的产生更加方便快捷。

2.1 WGM模式的基本原理

当一个WGM结构的壁尺寸很薄时,WGM将对壁内物质的折射率十分敏感,其特征波长同内部的折射率可以表达为^[42]

$$\lambda = \frac{2\pi r n_{\text{eff}}}{m} \quad (2)$$

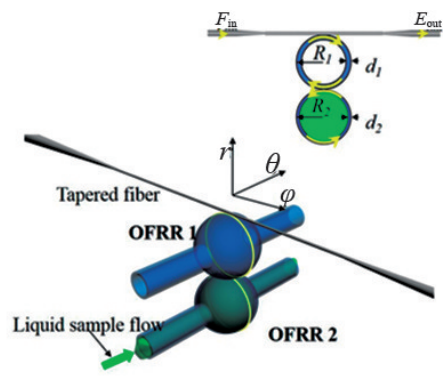
其中, λ 为WGM的特征波长; r 为WGM的半径; n_{eff} 为腔体内部的等效折射率, m 为WGM角动量的整数。

2.2 基于WGM模式的光流控传感器应用

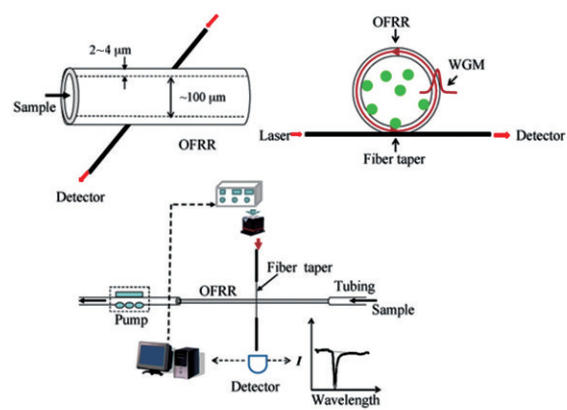
从式(2)可以看出,内部折射率的微小改变将会对WGM的特征波长造成影响。基于这一原理,一系列设计精巧的WGM模式光流控传感器被设计出来。Li等^[43]利用两个回音壁互相耦合的模式,通过在其中一个回音壁中通入液体,实现了对牛血清蛋白(BSA)的检测(图2(a))^[43]。当携带生物分子的液体通过下方的回音壁时,其内部环境发生了相应变化,从而导致输出光的变化。Luo等^[44]和Scholten等^[45]利用薄壁毛细管形成回音壁实现了对有机物的测量。对于纯固体的回音壁传感器,生物分子由于尺寸小、重量轻、缺少运输煤质等原因,很难使固体回音壁的模式发生改变。而通过与光流控技术相结合,液体的引入为回音壁模式对生物分子的探测提供了条件。同时,WGM对其腔内折射率变化敏感度极高,这一特性为WGM对生物分子检测的精准度提供了保证。这种通过液体穿过WGM内部实现等效折射率调控的光流控传感器,在微观粒子和生化检测方面已取得丰富的研究成果。具体应用包括对体溶液折射率的检测^[46]、DNA分子检测^[47-48](图2(b))^[48]、病毒颗粒检测(图2(c))^[49]、对单个纳米颗粒检测^[50]、农药检测^[51]、醇类蒸汽的检测^[52]、淋巴细胞检测等^[53]。

除了直接利用固体通过微纳加工技术制作WGM,然后嵌入到光流控系统中,光流控传感器还可以通过产生液滴(droplet)的方式直接在芯片内部产生WGM。这种方式可以省略微纳加工过程,将制作流程简化,同时芯片尺寸也会相应减小。Lee^[54]等利用硅油液体、罗丹明6G染料和LDS 722染料通过光流控系统产生内部

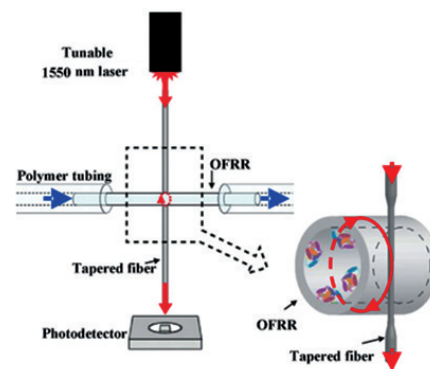
溶液为两种染料混合物的droplet,这种droplet具备球形结构及WGM的特性。由于WGM腔内的液体为染料,通过控制染料的性质,可以实现对染料携带的物质性质进行检测,在生化传感方面具有很大潜力。



(a) 对牛血清蛋白的检测



(b) 对DNA的检测



(c) 对病毒的检测

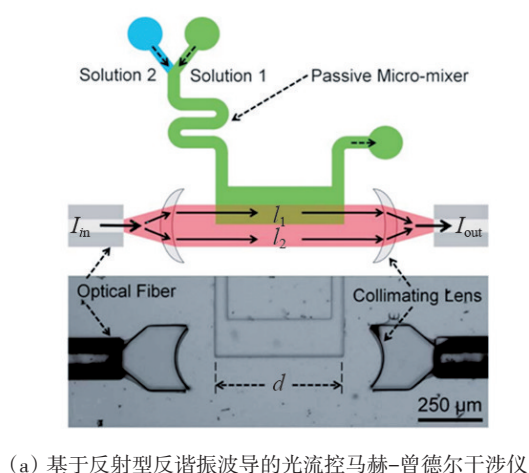
图2 基于WGM模式的生化探测光流控传感器
Fig. 2 Optofluidic biochemical sensor based on WGM

3 基于光波导的光流控传感器

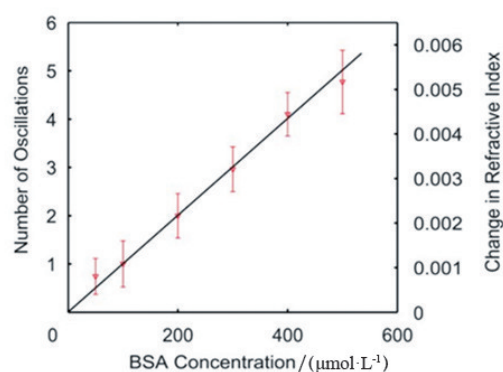
传统的光波导用于折射率检测时,光在固体波导中传播,传播过程中产生的倏逝场会与检测物发生相互作用进而产生相移或强度变化。由于倏逝场的趋肤深度相对较小,在固体条件下,被检测物质很难同倏逝场进行很强烈的作用。而液体波导的引入可以增大被检测物质同倏逝场的相互作用,实现更效率的波导传感器。

基于液芯的反谐振反射型波导(ARROW)是一种新型的光流体结构,在液芯中,光与物质的相互作用十分强烈^[55]。基于该结构的光流控传感器具有很高的效率和灵敏度,而结构却十分精简。Campopiano等^[56]率先利用多模液体ARROW实现了光学体折射率传感器。其液体的入口和出口被刻在一块硅基底上,发射光纤和接收光纤被直接插入到液芯中。在液芯的折射率变化时,透射光谱的位移将会发生改变,从而实现液芯

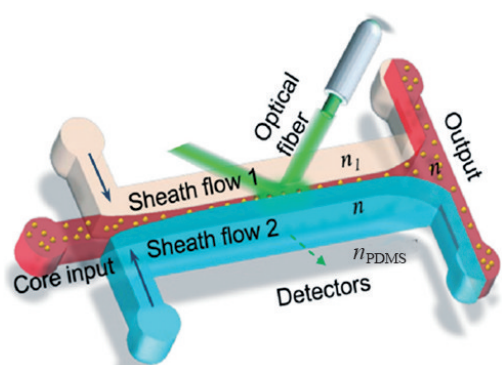
折射率的传感功能。其灵敏度可以达到每单位折射率555 nm,其可识别的折射率变化为 9×10^{-4} 。同样的结构还被用于实现水中特定蛋白质的检测^[57]。此外,多模液体反谐振反射型波导还可用于实现流式细胞仪应用^[58]。由细胞调制的激发光被ARROW限制在光流控沟道内传播,形成了高效的光调制机制。利用水力聚焦将细胞瘤控制在沟道中间,两根光纤被正交地置于沟道两侧以收集荧光的发射光谱。由于多模ARROW具有一个很大的核心区域,大量样品会产生较强的背景信号干扰,使其灵敏度降低。随着光流控加工技术的进步,实现了仅几微米的小尺寸沟道,使单模的液芯ARROW可以应用于更高灵敏度的检测。Yin等^[59]利用pL级别的核心容积实现了对染料分子的荧光检测,其检测的限度可以达到490个分子量级。通过改变芯片的结构设计,利用ARROW还可实现多种功能的光流控传感器。例如利用多模干涉实现波分复用器对单个病毒进行探测^[60],马赫-曾德尔干涉仪^[61]等(图3^[61-63])。



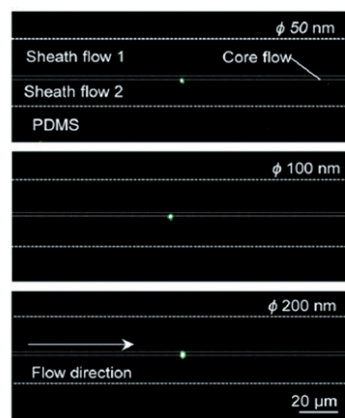
(a) 基于反射型反谐振波导的光流控马赫-曾德尔干涉仪



(b) 图(a)对牛血清蛋白的检测结果



(c) 基于阶跃折射率光波导的全内反射探测器



(d) 图(c)对纳米粒子的探测结果

图3 基于光波导的光流控传感器

Fig. 3 Optofluidic sensors based on optical waveguide

除了利用液芯的 ARROW 实现光流控传感器外,液-液光流控波导也可以实现利用倏逝场的探测功能。在不同种类流体分别从不同入口流入光流控芯片时,他们之间会发生对流扩散,而当入口及出口的压力稳定后,在芯片的沟道内,不同流体之间可以形成稳定的浓度场。其对流扩散过程可以表达为^[62]

$$D\nabla^2 C = U\nabla C \quad (3)$$

其中, D 为流体间的扩散系数; C 为摩尔浓度; U 为流体流速。

不同流体之间按照不同比例混合,其物质的量浓度和折射率之间存在一一对应的关系,因此其形成的浓度场可以进一步引申为折射率场。由式(3)可以看出,最终形成的场的分布主要与流速和扩散系数有关,其中等号左边的项为扩散的影响,等号右边的项为对流的影响。 Pe 数(Pe)是一个无量纲的系数,其大小由对流扩散系数,流速和芯片的特征尺寸决定。通过 Pe 值的大小,可以描述出对流和扩散程度的大小。当 Pe 值较大时,分布将由对流项主导,此时会在沟道内形成阶跃式的折射率分布。 $Liang$ 等^[63]通过调节通入液体的折射率,使得光以特定角度照射在阶跃的液液界面时,可以发生全反射,利用全反射产生的倏逝场实现了对微纳颗粒的探测和计数。在该应用中,液体被分为3股分别注入到芯片中,通过水力聚焦将中心液体夹流成宽度仅为 $1\ \mu\text{m}$ 的窄流。而液体之间具有十分平滑的界面,具有良好的反射条件,如图3(c)、图3(d)^[63]所示。其通入的液体分别为混合油(流体1,折射率为1.406,黏滞系数为 $9.2\ \text{mPa}\cdot\text{s}$),乙二醇和水的混合液(芯层和流体2,折射率为1.4,黏滞系数为 $6\ \text{mPa}\cdot\text{s}$)。光的入射角度为 85° ,入射角度同流体的折射率进行了相应匹配,可以使光在界面上恰好发生全反射,形成倏逝场,其趋肤深度为 $1\ \mu\text{m}$,同夹流层的大小相当。颗粒混合在芯层流体中,通过夹流存在于厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的全反射界面。当粒子通过倏逝场产生的区域时,被明显地照亮,实现探测和计数的功能。此外,利用阶跃折射率的光流控系统还可实现流式细胞仪^[63-64]等应用。

4 基于表面等离子共振的光流控传感器

当一束光在一定角度范围内入射到金属表面时,其电磁干扰会导致金属表面产生等离子波,倘若入射光和表面等离子波的传播常数相匹配,金属膜内的电

子将会产生共振,使得反射光强度大幅减弱,从而形成一个吸收峰,这就是表面等离子共振(SPR)现象。SPR对金属表面约 $300\ \text{nm}$ 范围内的折射率十分敏感,利用这一特性,可以实现折射率传感器和生化传感器应用。而SPR同样可以集成于光流控系统中,对液体或液体携带的物质进行分析和检测,实现基于SPR的光流控传感器应用^[65-68]。如 Lee 等^[65]将平行排布沟道的光流控芯片置于金膜上,配体物分子和分析物分子直接同时通入沟道中,在金膜表面进行相互作用,实现了对生物样品的检测和成像,如图4(a)所示。 $Barik$ 等^[67]利用金纳米孔阵列同光流控芯片相结合的方式实现了对生物样品的分析检测,其中,金纳米孔阵列还可产生梯度介电泳力以聚集生物样品,如图4(b)所示。

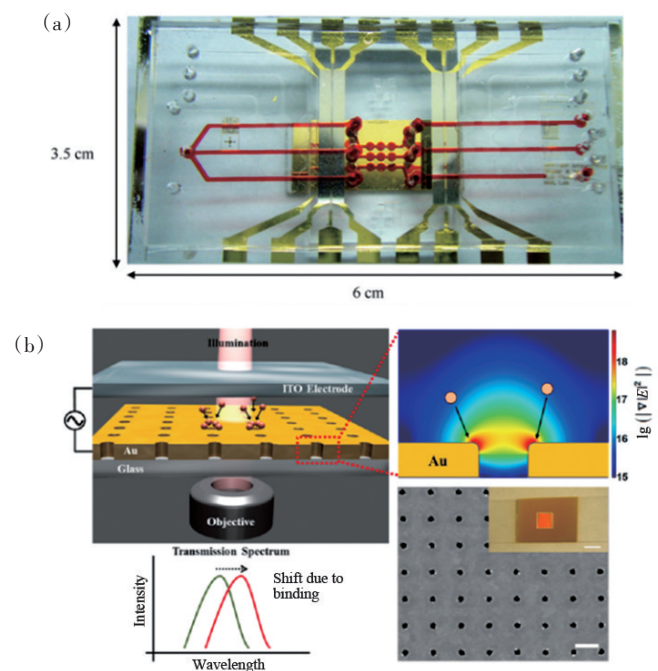


图4 基于表面等离子体共振的生化样品检测器

Fig. 4 Biochemical detectors based on surface plasmon resonance

5 结论

在光流控系统中,流体流经芯片时,流体本身和其携带的物质的折射率会对光的传播产生影响。传统的光学传感器同光流控系统相结合时,流体的折射率变化可以直接对光传感器产生响应,从而形成高集成度、小型化、低成本的光流控传感器。在光流控传感器中,有几个典型的结构,即光子晶体谐振腔、WGM模式、光波导及表面等离子体共振。这几种结构对其周边的折射率环境都十分敏感,微小的折射率差异可以导致光

响应信号的变化,这一特性使得光流控传感器对折射率具有很高的敏感度。

通过对基于不同结构的光流控传感器的分析,得出如下结论:(1)将光子晶体谐振腔同光流控系统相结合时,可以通过设计芯片结构使得流体通过光子晶体谐振腔的孔洞,孔洞内的折射率变化会令光信号的特征波长发生偏移,从而实现光流控传感器应用。这种类型的传感器可以用于测量气体浓度、液体折射率及生化分子的分析检测。(2)利用WGM腔体的光流控传感器可以在腔体中产生谐振,具有一个特征波长,并且特征波长对腔内环境十分敏感。由此,利用腔体的光流控传感器具有很高的灵敏度,同时仅对特征波长的强度和偏移观测,即可推断出相应参数的变化。由于流体是微纳粒子和生物分子的天然载体,使得基于腔体的光流控传感器在测量微小的生化物质方面具有得天独厚的优势。这类传感器在物质浓度检测和生化检测方面具有广泛的应用前景。(3)基于光波导的传感器利用全反射产生的倏逝场对物质进行探测,这种探测方式具有精简的结构,同时还具备高效率和高敏感度的特征,在生化检测,微小颗粒的分析上具有很大潜力。(4)基于表面等离子体共振的光流控传感器利用SPR对金属膜表面300 nm范围内折射率的变化十分敏感。当生物分子通过这一区域时,SPR的吸收峰会发生偏移,从而实现对生物分子的分析。这种传感器无需对分析物进行标记,可以简化检测流程。此外,SPR对折射率的敏感性也令其具有较高的测量灵敏度,使其在快速生化检测方面具有广泛的应用潜力。

在未来对微小粒子的探测中,尤其是对生物分子的分析 and 探测,离不开液体环境。光流控传感器将液体环境和光探测手段有机结合,在液体环境生化探测领域发挥出巨大潜能。随着光流控技术的发展,未来具有独特结构的光流控传感器将具有巨大的开发和应用价值。

参考文献(References)

- [1] Psaltis D, Quake S R, Yang C. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics[J]. *Nature*, 2006, 442(7101): 381-386.
- [2] Monat C, Domachuk P, Eggleton B J. Integrated optofluidics: A new river of light[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 106-114.
- [3] Horowitz V R, Awschalom D D, Pennathur S. Optofluidics: Field or technique[J]. *Lab on a Chip*, 2008, 8(11): 1856-1863.
- [4] Erickson D, Sinton D, Psaltis D. Optofluidics for energy applications[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(10): 583-590.
- [5] Bao B, Melo L, Davies B, et al. Detecting supercritical CO₂ in brine at sequestration pressure with an optical fiber sensor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(1): 306-313.
- [6] Liu P Y, Chin L K, Ser W, et al. An optofluidic imaging system to measure the biophysical signature of single waterborne bacteria[J]. *Lab on a Chip*, 2014, 14(21): 4237-4243.
- [7] Liu P Y, Chin L K, Ser W, et al. Cell refractive index for cell biology and disease diagnosis: Past, present and future[J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(4): 634-644.
- [8] Zhu J M, Shi Y, Zhu X Q, et al. Optofluidic marine phosphate detection with enhanced absorption using a Fabry-Pérot resonator[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(23): 4025-4030.
- [9] Shi Y, Zhu X Q, Liang L, et al. Tunable focusing properties using optofluidic Fresnel zone plates[J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(23): 4554-4559.
- [10] Yang Y, Liu A Q, Chin L K, et al. Optofluidic waveguide as a transformation optics device for lightwave bending and manipulation[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(48): 651.
- [11] Zhao H T, Yang Y, Chin L K, et al. Optofluidic lens with low spherical and low field curvature aberrations[J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(9): 1617-1624.
- [12] Zhu X, Liang L, Zuo Y, et al. Tunable visible cloaking using liquid diffusion[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(6): 1700066.
- [13] Liu H L, Liang L, Zhu X Q, et al. Tunable transformation optical waveguide bends in liquid[J]. *Optica*, 2017, 4(8): 839-846.
- [14] Li L, Zhu X Q, Liang L, et al. Switchable 3D optofluidic Y-branch waveguides tuned by Dean flows[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38338.
- [15] Roques-Carmes T, Gigante A, Commenge J M, et al. Use of surfactants to reduce the driving voltage of switchable optical elements based on electrowetting[J]. *Langmuir*, 2009, 25(21): 12771-12779.
- [16] Yang Y, Chin L K, Tsai J M, et al. Transformation optofluidics for large-angle light bending and tuning[J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(19): 3785-3790.
- [17] Hashimoto M, Mayers B, Garstecki P, et al. Flowing lattices of bubbles as tunable, self-assembled diffraction gratings[J]. *Small*, 2010, 2(11): 1292-1298.
- [18] Wu W, Zhu X, Zuo Y, et al. Precise sorting of gold nanoparticles in flowing system[J]. 2016. 3(12): 2497-2504.
- [19] Croningolomb M, Omenetto F, Eggleton B J. Applications of optical tweezers to optofluidics[J]. *Optofluidics*, 2006, 6329: 63290B.
- [20] Liu H L, Shi Y, Liang L, et al. A liquid thermal gradient refractive index lens and using it to trap single living cell in flowing environments[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(7): 1280-1286.
- [21] Cho H, Kim H Y, Kang J Y, et al. Capillary passive valve in

- microfluidic systems[J]. 2004, 1: 263–266.
- [22] Selvaganapathy P, Carlen E T, Mastrangelo C H. Electrothermally actuated inline microfluidic valve[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2003, 104(3): 275–282.
- [23] Kumar A, Rajesh R, Singhal G, et al. Analysis of various optical pumping schemes for liquid oxygen lasers[J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2/3): 385–394.
- [24] Xin Z. Solid and liquid Xe-129 NMR signals enhanced by spin-exchange optical pumping under flow[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(10): 2223–2224.
- [25] Fan X, White I M. Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(10): 591–597.
- [26] Zhang Y N, Zhao Y, Zhou T, et al. Applications and developments of on-chip biochemical sensors based on optofluidic photonic crystal cavities[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 18(4): 57–74.
- [27] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. *Photonic crystals: Molding the flow of light*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2008, 3(6): 38–47.
- [28] Nair R V, Vijaya R. Photonic crystal sensors: An overview[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2010, 34(3): 89–134.
- [29] Mortensen N A, Xiao S, Pedersen J. Liquid-infiltrated photonic crystals: Enhanced light-matter interactions for lab-on-a-chip applications[J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2008, 4(1/2): 117–127.
- [30] Süner T, Stichel T, Kwon S H, et al. Photonic crystal cavity based gas sensor[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(26): 2486.
- [31] Zhang H, Jágorská J, Thomas N L, et al. Refractive index sensing with an air-slot photonic crystal nanocavity[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2523–2525.
- [32] Li K, Li J, Song Y, et al. L-n slot photonic crystal microcavity for refractive index gas sensing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(5): 1–9.
- [33] Zhang Y N, Zhao Y, Wang Q. Measurement of methane concentration with cryptophane E infiltrated photonic crystal microcavity[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2015, 209(209): 431–437.
- [34] Falco A D, Ofaolain L, Krauss T F. Chemical sensing in slotted photonic crystal heterostructure cavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(6): 063503.
- [35] Lai W C, Chakravarty S, Zou Y, et al. Slow light enhanced sensitivity of resonance modes in photonic crystal biosensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(4): 041111.
- [36] Zhou J, Tian H, Yang D, et al. Integration of high transmittance photonic crystal H₂ nanocavity and broadband W₁ waveguide for biosensing applications based on Silicon-on-Insulator substrate[J]. *Optics Communications*, 2014, 330(330): 175–183.
- [37] Zhang Y N, Zhao Y, Hu H F. Miniature photonic crystal cavity sensor for simultaneous measurement of liquid concentration and temperature[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2015, 216: 563–571.
- [38] Domachuk P, Littler I C M, Croningolomb M, et al. Compact resonant integrated microfluidic refractometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(9): 330A.
- [39] He Z, Tian F, Zhu Y, et al. Long-period gratings in photonic crystal fiber as an optofluidic label-free biosensor[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2011, 26(12): 4774–4778.
- [40] Wu C, Tse M L, Liu Z, et al. In-line microfluidic integration of photonic crystal fibres as a highly sensitive refractometer[J]. *Analyst*, 2014, 139(21): 5422–5429.
- [41] Zhang N, Humbert G, Wu Z, et al. In-line optofluidic refractive index sensing in a side-channel photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27674.
- [42] Suter J D, Fan X. Overview of the optofluidic ring resonator: A versatile platform for label-free biological and chemical sensing[C]//International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society. Piscataway NJ: IEEE: IEEE, 2009: 1042.
- [43] Li M, Wu X, Liu L, et al. Self-referencing optofluidic ring resonator sensor for highly sensitive biomolecular detection[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, 85(19): 9328–9332.
- [44] Luo Y, Chen X, Xu M, et al. Optofluidic glucose detection by capillary-based ring resonators[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(1): 12–14.
- [45] Scholten K, Fan X, Zellers E T. A microfabricated optofluidic ring resonator for sensitive, high-speed detection of volatile organic compounds[J]. *Lab on a Chip*, 2014, 14(19): 3873–3880.
- [46] Fan X, White I M, Zhu H, et al. Overview of novel integrated optical ring resonator bio/chemical sensors[C]//Laser Resonators and Beam Control IX. Bellingham WA: International Society for Optics and Photonics, 2007, 6452: 64520M.
- [47] Zhu H, White I M, Suter J D, et al. Opto-fluidic micro-ring resonator for sensitive label-free viral detection[J]. *Analyst*, 2008, 133(3): 356–360.
- [48] Suter J D, Howard D J, Shi H, et al. Label-free DNA methylation analysis using opto-fluidic ring resonators[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2010, 26(3): 1016–1020.
- [49] Zhu H, White I M, Suter J D, et al. Phage-based label-free biomolecule detection in an opto-fluidic ring resonator[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2008, 24(3): 461–466.
- [50] Zhi Y, Yu X, Gong Q, et al. Single nanoparticle detection using optical microcavities[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(12): 1604920.
- [51] White I M, Cupps J M, Zhang P, et al. Versatile opto-fluidic ring resonator lasers with ultra-low threshold[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15523–15530.
- [52] Sun Y, Liu J, Frye-Mason G, et al. Optofluidic ring resonator sensors for rapid DNT vapor detection[J]. *Analyst*, 2009, 134(7): 1386–1391.

- [53] White I M, Oveys H, Fan X, et al. Integrated multiplexed biosensors based on liquid core optical ring resonators and anti-resonant reflecting optical waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(19): 191106.
- [54] Lee W, Luo Y, Zhu Q, et al. Versatile optofluidic ring resonator lasers based on microdroplets[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19668–19674.
- [55] Testa G, Persichetti G, Bernini R. Liquid core ARROW waveguides: A promising photonic structure for integrated optofluidic microsensors[J]. *Micromachines*, 2016, 7(3): 47.
- [56] Campopiano S, Bernini R, Zeni L, et al. Microfluidic sensor based on integrated optical hollow waveguides[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1894–1896.
- [57] Bernini R, Minardo A. Integrated silicon optical sensors based on hollow core waveguide[J]. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2007, 6477: 647714–647714–14.
- [58] Bernini R, Nuccio E D, Brescia F, et al. Development and characterization of an integrated silicon micro flow cytometer [J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2006, 386(5): 1267–1272.
- [59] Yin D, Barber J P, Hawkins A R, et al. Highly efficient fluorescence detection in picoliter volume liquid-core waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(21): 211111.
- [60] Ozcelik D, Parks J W, Wall T A, et al. Optofluidic wavelength division multiplexing for single-virus detection[J]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2015, 112(42): 12933–12937.
- [61] Lapsley M I, Chiang I K, Zheng Y B, et al. A single-layer, planar, optofluidic Mach-Zehnder interferometer for label-free detection[J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(10): 1795–1800.
- [62] Perumal M, Raju K G R. Approximate convection-diffusion equations[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1999, 4(2): 160–164.
- [63] Liang L, Zuo Y F, Wu W, et al. Optofluidic restricted imaging, spectroscopy and counting of nanoparticles by evanescent wave using immiscible liquids[J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(16): 3007–3014.
- [64] Mao X, Nawaz A A, Lin S C, et al. An integrated, multiparametric flow cytometry chip using "microfluidic drifting" based three-dimensional hydrodynamic focusing[J]. *Biomicrofluidics*, 2012, 6(2): 24113–241139.
- [65] Lee K H, Su Y D, Chen S J, et al. Microfluidic systems integrated with two-dimensional surface plasmon resonance phase imaging systems for microarray immunoassay[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2008, 23(4): 466–472.
- [66] Zhang D, Lu Y, Jiang J, et al. Nanoplasmonic biosensor: Coupling electrochemistry to localized surface plasmon resonance spectroscopy on nanocup arrays[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2015, 67: 237–242.
- [67] Barik A, Otto L M, Yoo D, et al. Dielectrophoresis-enhanced plasmonic sensing with gold nanohole arrays[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 2006–2012.
- [68] Luo Y, Yu F, Zare R N. Microfluidic device for immunoassays based on surface plasmon resonance imaging[J]. *Lab on a Chip*, 2008, 8(5): 694–700.

Optofluidic sensors and their applications

ZHU Xiaoqiang, LIANG Li, SHI Yang, YANG Yi

School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract Based on the optofluidic technology, many kinds of high performance optofluidic sensors can be fabricated by different designs. The optofluidics sensors can be divided into four categories according to their structures. The first two categories are the optofluidic sensors based on the photonic crystal cavity and the whispering gallery mode. When the fluids flow through the cavities of the sensors, the couple-mode will change because of the changed refractive index by the fluids, and the responding light signals will change as well. The third category optofluidic sensors are based on the optical waveguide. The fluids will interact with the evanescent field produced by the total reflection of the light in the optical waveguide, leading to the change of the responding light signals. The fourth category optofluidic sensors are based on the surface plasmon resonance. The sensors are very sensitive to the refractive index of the metal surface, and the refractive index changed by the fluids will shift the resonance peak. The optofluidic sensors are very sensitive to the changing of the refractive index, with high sensitivity and accuracy, meanwhile, the optofluidic system enjoys the advantages of low-cost, miniaturization and simple structure. As the detectors are approaching the microcosmic scale, the optofluidic sensors will play an important role in the detection and biochemical analysis area.

Keywords optofluidics; sensor; detection; biochemical analysis ●



(责任编辑 王志敏)