

基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤折射率传感器的研究进展

范振凯*, 张子超, 王保柱, 王莹莹, 赵荣佳

河北科技大学信息与科学工程学院, 河北 石家庄 050018

摘要 介绍了 D 型光子晶体光纤折射率传感器、具有大动态折射率测量范围的多芯多孔光子晶体光纤 (PCF) 表面等离子体共振 (SPR) 折射率传感器及双通道 SPR-PCF 折射率传感器, 概括了其优点, 并分析了其自身存在的局限性。SPR-PCF 传感器有望在生物医疗诊断、食品安全检测、矿井勘探检测和环境化学检测等技术领域取得突破。

关键词 光纤光学; 表面等离子体共振; 光子晶体光纤; 折射率; 传感器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.070004

Research Progress of Photonic Crystal Fiber Refractive Index Sensors Based on Surface Plasmon Resonance Effect

Fan Zhenkai*, Zhang Zichao, Wang Baozhu, Wang Yingying, Zhao Rongjia

School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China

Abstract The D-type photonic crystal fiber (PCF) refractive index sensors, the multi-core porous PCF surface plasmon resonance (SPR) refractive index sensors with a large dynamic refractive index measurement range, and the dual-channel SPR-PCF refractive index sensors are introduced. Their advantages are summarized and their inherent limitations are analyzed. The SPR-PCF sensors are expected to make breakthroughs in the technical fields such as biomedical testing, food safety testing, mine exploration testing, and environmental chemical testing.

Key words fiber optics; surface plasmon resonance; photonic crystal fiber; refractive index; sensor

OCIS codes 060.2270; 060.2370; 120.4570; 280.5715

1 引言

折射率是固体、液体和气体材料的固有属性,在光学检测领域具有重要的地位,通常可作为光学物质检测领域的一项重要参数。通过测试折射率,可以分析物质的浓度、纯度等物理性质和光学属性。因此,其在折射率检测领域的研究受到了广泛的重视。迄今为止,光纤折射率传感器包括法布里-珀罗干涉仪、萨尼亚克干涉仪,马赫-曾德尔干涉仪、单模-多模-单模光纤结构、布拉格光栅、太赫兹、D 型光纤、空心光纤、微毛细管和表面等离子共振光子晶体光纤 (PCF) 等多种类型。近年来,光子晶体光纤

的微纳多孔结构与金属表面等离子体共振相结合为检测液体材料提供了新的传感技术载体,开辟了液体折射率传感器研究的新领域。表面等离子体共振 (SPR) 光子晶体光纤折射率传感器以其坚固耐磨、便携操作、高灵敏度和高分析度等特性而广泛应用于医疗卫生诊断^[1]、食品安全监测^[2]、水质监测^[3]和环境监测^[4]等领域,并受到人们的关注。SPR 效应还用于光电子器件^[5],如光学可调谐滤波器^[6]、调制器^[7]、SPR 成像^[8]、光学温度传感器^[9]生物分子检测仪^[10],以及薄膜厚度监测^[11]等。

传统的 SPR 折射率传感器的局限性在于其不适合作为移动光学和机械部件使用,而基于光学棱

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-10-29; 录用日期: 2018-11-01

基金项目: 河北省高等学校青年拔尖人才项目 (BJ2018040)、河北科技大学人才引进科研启动项目 (1181324)

* E-mail: zhkfan@hebust.edu.cn

镜的 SPR 折射率传感器虽然性能较强,但所需的光学和机械组件的体积庞大。20 世纪 90 年代,出现了用于化学检测的传统光纤基 SPR 折射率传感器。通过对该传感器进行各种配置优化,获得了更宽的工作检测范围和更高的分辨率。20 世纪后期,提出了基于微结构光纤(MOF)的 SPR 折射率传感器,解决了传统折射率传感器灵敏度低的缺陷,开辟了光纤折射率传感器的新领域。1993 年, Jorgenson 等^[12]首次报道了基于 SPR 的光子晶体光纤折射率传感器。采用光子晶体光纤的纤芯作为光能量的传输载体,选取金膜镀层包覆在光纤纤芯表面激发 SPR 的技术方法,获得了较高的折射率灵敏度。SPR-PCF 折射率传感器具有便携式、耐磨损、小型化、易集成、单模传播和瞬态场控制等优点,赋予 SPR-PCF 在折射率传感器的应用中存在巨大潜在价值。目前,世界上科技强国如澳大利亚、法国、日本、加拿大等均将光子晶体光纤制备及其应用技术列为本国关键及核心技术之一,将其运用于军事领域并产生了不可估量的作用。

本文概述了表面等离子体折射率传感器的基本原理,并对近年报道的 SPR 光子晶体光纤折射率传感器进行归类和系统阐述,发现了 SPR 光子晶体光纤折射率传感器具有灵敏度高、测试范围大、灵活性强、小型化、便携式和易集成等优点,并指出了其自身不可突破的局限性。

2 表面等离子体共振原理

根据法国物理学家菲涅耳所提出的光学定理可知,当光从光密介质(折射率 n_1)射入光疏介质(折射率 n_2),并且入射角增大到某一角度,即入射角大于或等于临界角 $C = \arcsin(n_2/n_1)$ 时,折射角约为 90° ,折射光完全消失且只剩下反射光,此时会发生光的全内反射。但是,从波动光学的角度研究全内反射则截然不同,涉及倏逝波在介质中的传输性质和实现控制倏逝波的技术,为研究光纤折射率传感

器奠定基础。入射光激发金属表面的自由电子引起相互作用而建立起来的电荷密度的振荡,称为表面等离子体激元(SPP)。其不能保持稳定传输,即形成一个按指数规律衰减的电场,并且可以穿透并进入到周围约几十 nm 的介质中,所形成了瞬间逝去的电场即为倏逝场^[13]。当满足全内反射条件时,入射光传播到介质界面,会先透过光疏介质约一个波长深度,然后沿着介质界面漂移约半个波长再返回到光密介质中,而不是直接在介质界面产生反射光。表面等离子体在热平衡时呈电中性,当表面等离子体内部受到外界扰动(如交流电场、磁场和光照射)时,则表面等离子体内部的一些区域电荷密度不为零,此时正负电荷中心产生分离而形成电偶极子,进而产生了表面等离子体极化现象。这种极化可以沿着金属表面向前传播,形成表面等离子体极化波。

在图 1 中,对于金属膜而言,当入射光以合适的入射角从光密介质射向光疏介质时,会像在两种物质界面处产生光的全反射一样在金属界面发生全反射。入射光沿平行于界面的波矢分量与表面等离子体极化波的波矢相等时,会激发表面等离子体波,这种现象称为表面等离子体共振(SPR),其所形成的波称为表面等离子体波^[14]。同理,就金属纳米颗粒而言,当入射光射到金属纳米颗粒上时,若入射光的频率 ν_λ 与金属纳米颗粒传导电子时的整体振荡频率 ν_m 相等,则金属纳米颗粒吸收光子的大部分能量,此时会发生局域表面等离子体共振(LSPR),这将导致反射光或透射光光强的大幅度减弱。此时,在探测光谱上会观测到对应的共振吸收峰,而且共振吸收峰对介质的折射率变化非常敏感。当金属表面周围的介质折射率发生微小变化时,SPR 共振吸收峰的位置也会随着介质折射率的变化而移动,因此 SPR 在传感领域有着非常重要的应用。依据此原理,可以进行折射率传感器的设计及性能优化。图 1(a)中, E 为激发的电场强度, H_y 为激发的 y 轴方向的磁场强度。

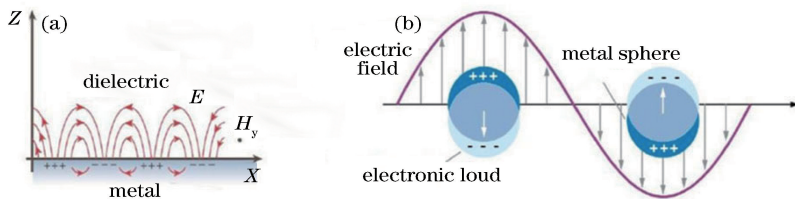


图 1 SPR 与 LSPR 的电磁场激发过程。(a)横磁(TM)波在金属-电介质接触面激发电磁场的示意图;
(b)局域表面等离子体激发的示意图

Fig. 1 Electromagnetic field excitation processes of SPR and LSPR. (a) Schematic of electromagnetic field excitation of TM wave in metal-dielectric contact interface; (b) schematic of local surface plasmon excitation

新型生物折射率传感分析技术是基于表面等离子共振原理而实现的,相比于化学的标记生物分子和提纯生物组分的生物分析方法更简单易行,只需在常温常压条件下使生物样本折射率溶液,如蛋白质、寡核苷酸、单糖、多糖、寡聚糖,以及病毒、细菌、酶、细胞、小分子化合物等^[15]接触并通过传感器芯片就能实现对样品的实时检测。贵金属能够强烈地激发并引起表面等离子共振效应,而且表面等离子共振可以增强拉曼效应,进而达到生物分子微量检测的目的。

3 SPR-PCF 折射率传感器

3.1 D 型 SPR-PCF 折射率传感器

将 D 型 SPR-PCF 的光纤包层的顶部抛光平

坦,并将金属层和样品放置在平坦部分的顶部。一般金属层应靠近光纤的核心放置,以增强表面等离子体共振效应与待测样品的强烈相互作用,从而大幅度提高 D 型 PCF 传感器的敏感性能。至今,金属 SPR-PCF 折射率传感器的实验研究仍是一项核心的技术难题。主要有两个技术瓶颈问题:1)实现单模光纤与光子晶体光纤高效率的熔接;2)金属镀膜或填充型光子晶体光纤的制备技术仍不成熟,存在巨大的技术挑战。若要将光子晶体光纤与表面等离子体结合而产生的优点应用到光纤传感检测领域中去,则需要上述问题上获得突破。

Chen 等^[16]提出了一种基于 SPR 效应的新型 D 型 PCF 折射率传感器,其结构如图 2(a)所示。研

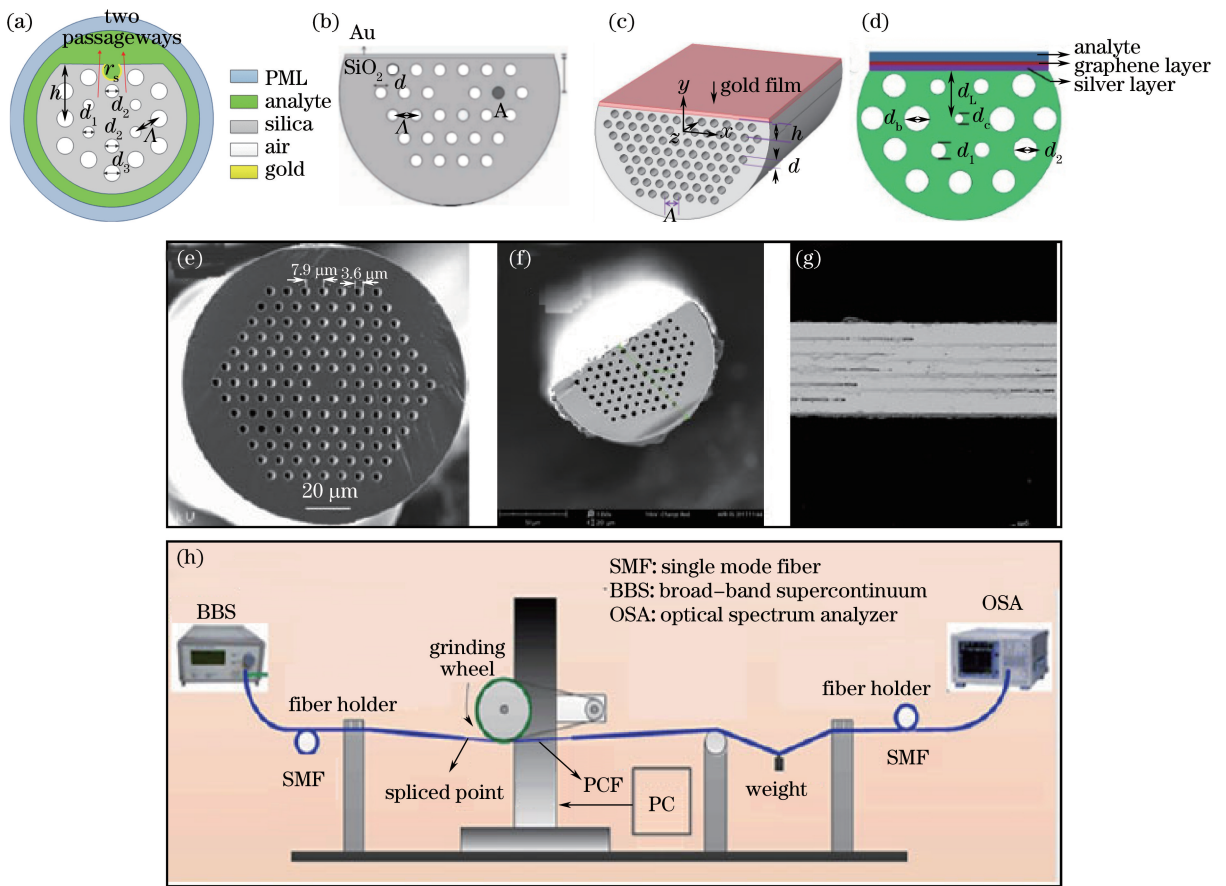


图 2 4 类 D 型 PCF 的结构和 D 型 PCF 的制备原理。(a) 双通道的 D 型 PCF 传感器的示意图^[16]; (b) 双参量的 D 型 PCF 传感结构剖面图^[17]; (c) 金膜涂覆的 D 型 PCF 的 SPR 传感器三维模型^[18]; (d) 石墨烯层涂覆的 D 型 SPR-PCF 传感器结构示意图^[19]; (e) 抛光前 PCF 的扫描电镜图; (f) 金纳米层覆盖的 D 型 PCF 的横截面; (g) D 型 PCF 的侧抛光镀金表面; (h) 侧抛 PCF 的系统

Fig. 2 Structural diagrams of four types of D-type PCFs and preparation principle of D-type PCF. (a) Schematic of dual channel D-type PCF sensor^[16]; (b) profile of double-parameter D-type PCF sensing structure^[17]; (c) three-dimensional model of gold film coated D-type PCF SPR sensor^[18]; (d) structural diagram of graphene layer coated D-type SPR-PCF sensor^[19]; (e) SEM image of PCF before polishing; (f) cross-section of gold nanofilm coated D-type PCF; (g) side-polished surface of gold coat D-shaped PCF; (h) PCF side-polishing system

究发现其与普通的 D 型光纤的不同。SPR 效应是通过开环通道上包覆金薄膜激发,进而实现谐振效应的增强,获得了折射率传感器高的光谱折射率灵敏度。此外,该通道的使用减小了镀金面积,使制作工艺更加简化,以及获得更高的成本效益。仿真结果表明,该 SPR-PCF 折射率传感器获得了超高的光谱灵敏度,能检测到 1.20~1.29 的低折射率液体样品。由此可见,SPR 折射率传感器具有高传感性能、低折射率检测范围和结构简单紧凑等优点,在低折射率检测应用中具有超强的竞争力。2015 年,施伟华等^[17]提出了一种基于 SPR 效应和定性耦合两种传感机理的 D 型 PCF 折射率和温度双参量传感器。如图 2(b)所示,其传感单元通过抛磨掉 PCF 的部分包层并在抛磨平面上镀金膜以实现对待测液体的折射率检测。数值结果证明,该光纤传感器在 10~80 °C 温度范围获得了约为 11.6 nm/°C 的温度灵敏度,并且在折射率 1.34~1.44 范围内其光谱灵敏度最高可达 26000 nm/RIU (RIU 为折射率单位)。因此, D 型 SPR-PCF 双参量传感器不仅具有简单的传感结构,而且获得了较高的灵敏度,有望在浓度测量、环境检测和生化反应检测等领域产生不可估测的价值。

2017 年, Wu 等^[18]提出了一种 D 型 SPR-PCF 折射率传感器并对其进行了数值分析和实验探究,其结构如图 2(c)所示。金膜和分析物都沉积在 PCF 抛光表面上。采用有限元法分析了 SPR-PCF 折射率传感器的传感特性和模式耦合特性。仿真结果证明,试图通过改变结构的占空比、晶格间距和抛光深度改善传感器的波长灵敏度是不可行的。因此,提出了通过优化光纤结构和选择新型材料降低材料折射率来提高 D 型光纤 SPR 折射率传感器灵敏度的技术方案。调查发现,当 PCF 材料的折射率为 1.36 时,该传感器具有约为 21700 nm/RIU 的灵敏度,并开发了一套 D 型 SPR-PCF 传感系统,验证了模型预测与实验结果符合较好的一致性。

由于 D 型 PCF 的快速响应以及实时分布式传感特性,激发了基于 SPR 效应的 D 型 PCF 折射率传感器在化学检测、生物诊断和工业生产中的强大竞争力。2015 年, Dash 等^[19]提出了一种基于石墨烯二维材料涂覆的 D 型 PCF 基表面等离子体激元化学传感器,其结构如图 2(d)所示。对于提出的石墨烯二维材料涂覆的 D 型 PCF 基等离子体激元化学传感器,采用有限元法(FEM)对其进行了数值分析。在该过程中,将整个 PCF 结构分成大量互连

接的三角形子区域,进而可直接对光纤进行数值求解。将金属银选作表面等离子体共振激发金属材料,石墨烯^[20]的加入有助于防止银表面的氧化变质。此外,由于石墨烯的六角形单元与广泛存在于生物分子中基于碳原子环结构之间的 $\pi-\pi$ 堆叠相互作用,会促使光纤感应区域对生物分子的吸收。该传感器可以检测生物层的厚度,如抗体以及生化分析物的折射率,还可在振幅和波长查询过程有着重要应用。实验结果表明,其具有高达 216 RIU⁻¹ 的振幅灵敏度和 4.6×10^{-5} 的折射率分辨率,同时发现光谱灵敏度高达 3700 nm/RIU,传感器分辨率为 2×10^{-5} 。此外,可以实现 39 pm 的分辨率,用于确定振幅询问方法中的生物层厚度,以及 50 pm 的相同频谱查询方案。利用最新的纳米加工技术^[21]和少量石墨烯商业合成技术^[22]的优势,所提出的结构获得了广泛的应用。

3.2 开槽模型 PCF-SPR 折射率传感器

开槽 PCF-SPR 传感器的研究为检测多种分析物样品提供了技术保障,如图 3 所示。通过对光纤包层第一环中的气孔直径进行定位,实现了高双折射效果^[23]。双折射是光纤的重要光学属性,更是权衡光纤保偏性能的重要参数,导致在 x 和 y 极化中获得更强光传播信号以达到检测多路复用分析物的能力。2009 年, Hassan 等^[24]首次提出了基于微结构光子带隙光纤型 SPR 生物折射率传感器,如图 3(a)所示。该传感器的生物层厚度低至 0.039 nm,且证实分辨率在 600~920 nm 范围内,以及证明对于同一 SPR-PCF 传感器的光谱存在几种等离激元激发的可能性;在靠近金属层的纤维包层中引入缺陷来实现等离激元峰的可调谐性。2014 年, Otupiri 等^[25]研究了一种双折射 PCF 和两种基于微流体槽的 SPR 生物传感器,如图 3(b)所示。将气孔放置在纤芯中心附近引入双折射行为,使得核心模式的 x 或 y 极化与 SPP 模式之间共振耦合增强,进而极大地提升了传感器性能。对于 x 和 y 偏振分别实现 5×10^{-5} RIU⁻¹ 和 6×10^{-5} RIU⁻¹ 的分辨率。

3.3 液芯多孔光纤 SPR 折射率传感器

液芯多孔微结构光纤 SPR 折射率传感器就是在部分或所有的气孔中填充特定的待测液体,以充分利用 PCF 结构中的天然气孔和结构灵活调节性。因此,逐渐开始研究调查多芯孔微结构光纤。2017 年, Villatoro 等^[26]利用多芯光纤制作了一种基于强耦合的干涉仪,并将其运用到精确振动传感领域; Zhou 等^[27]制作了一种迈克耳孙干涉仪利用一种新

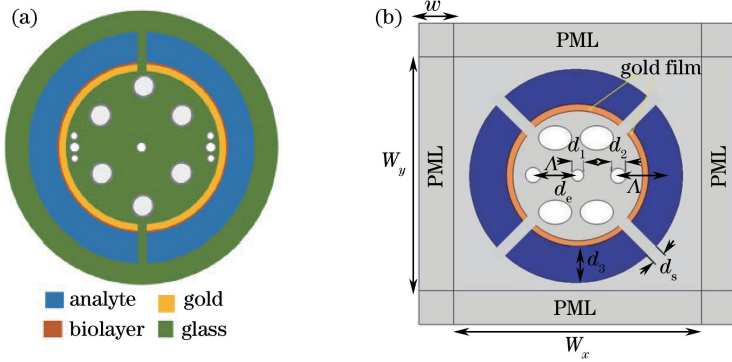


图3 开槽 PCF-SPR 传感器。(a)微结构光子带隙型 SPR 生物传感器的横截面；
(b)微流开槽型 PCF-SPR 生物传感器的横截面^[25]

Fig. 3 Slotted PCF-SPR sensor. (a) Cross-section of microstructured photonic bandgap SPR biosensor;
(b) cross-section of microfluidic slotted PCF-SPR biosensor ^[25]

型的七纤芯的光子晶体光纤,并将其应用于温度传感检测;Zhang 等^[28]制作了一种中间拉锥形的多纤芯光子晶体光纤折射率传感器,并且在实验中获得验证。因此,近年对多纤芯的光子晶体光纤在传感领域的研究和应用已发展成为一个科学热点问题,尤其是在多纤芯光子晶体光纤折射率传感器领域发展迅速。

2013 年,Shuai 等^[29]首次提出了一种封闭型式的液芯光子晶体光纤(LC-PCF)传感器设计。如图 4(a)所示,其结构有 6 个相同的液芯围绕一个金属化分析物通道。该新颖的设计不仅保证金属

微通道的均匀性,而且不受相邻分析物通道之间的干扰。通过有限元法对传感性能进行数值研究,首次发现基于 PCF 的等离子体传感器中存在负(RI)敏感现象。数值结果证明,基模有效折射率和 SPP 模式的折射率都对填充的液态分析物 RI 敏感。当 SPP 模式有效指数的增量大于基本模式的增量时,LCPCF-SPR 传感器具有正的 RI 灵敏度,然而基模的增量一旦变大,导致传感器显示负 RI 灵敏度。同时研究了几何参数对谐振频谱有意义的影响,发现通过调整结构参数可易将谐振波长调谐到期望值^[30]。

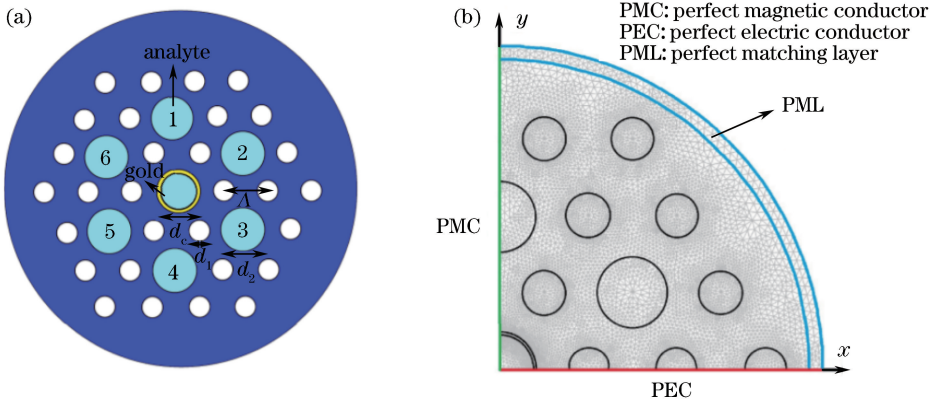


图4 封闭式的 LC-PCF。(a) LC-PCF 传感器横截面示意图;(b) FEM 网格化及边界条件设置^[29]

Fig. 4 Closed-type LC-PCF. (a) Cross-sectional diagram of LC-PCF sensor; (b) FEM meshing and boundary condition setting ^[29]

3.4 金属镀膜的 PCF-SPR 折射率传感器

Hassani 等^[31]提出了基于 MOF 的 SPR 传感器的设计方法及工作原理,如图 5(a)所示。利用微结构光纤的核心导向模式和等离子体激元模式的有效折射率的相位匹配原理,在光纤中渗入微流体以实现高效的分析流动。通过向纤芯中引入中空微结构降低模式折射率,从而促进相位匹配,增强了表面

等离子体共振的强度。同时,使用包含大尺寸分析物的通道,实现了改进光纤中微流体的分布。数值研究证明, 10^{-4} 的折射率变化导致透射光的强度易于检测到 1% 的分辨率变化。

Rifat 等^[32]通过全矢量 FEM 数值研究石墨烯-银沉积层的 PCF 等离子体激元的传感器,如图 5 (b)所示。石墨烯层用于抑制活性等离子体物质银

的氧化。金属通道孔和纤维芯用液体样品(一种高 RI 液体分析物)渗透。由于液体填充芯同时满足最佳 RI 和色散关系, SPR 传感性能显著提高。假设传感器能够检测到传输强度的最小 1% 变化, 则已证明高达 418 RIU^{-1} 的幅度灵敏度, 其提供了 $2.4 \times$

10^{-5} RIU 的传感器分辨率。数值结果证明, 提出的传感器获得最大 RI 灵敏度为 3000 nm/RIU , 分辨率为 $3.33 \times 10^{-5} \text{ RIU}$, 而平均 RI 灵敏度在 $1.46 \sim 1.49$ 范围内高达 2390 nm/RIU 。

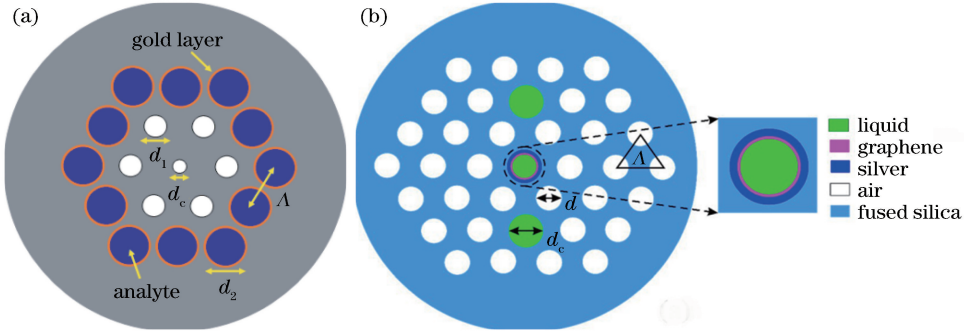


图 5 液体填充型金属层覆盖的 PCF。(a)液体填充型金层覆盖的 PCF 传感器截面图;
(b)液体填充型银层覆盖的 PCF 传感器的横截面^[31]

Fig. 5 PCF covered with liquid-filled metal layer. (a) Cross-sectional diagram of liquid-filled PCF sensor covered with gold layer; (b) cross-sectional diagram of liquid-filled PCF sensor covered with silver layer^[31]

3.5 双通道多孔光纤 SPR 传感器

近年来, 科研工作者报道的各种高度集成化、小型化和高灵敏度的 SPR 传感器, 如图 2 所示, 但是在实际应用中对待测样品进行多通道、多参量、自参考的检测技术需要进一步探讨。由此, 相继提出一系列的功能型 PCF-SPR 传感器, 其中包括多通道 PCF-SPR 传感器。2017 年, Lu 等^[33]提出了一种具有潜在成本效益的多层涂覆的 SPR 毛细管传感器, 其原理如图 6 所示, 其中光线外部的 7 mm Au/ITO 涂覆区域和毛细管内部 20 mm Ag 的涂覆层是该传感器的感应区域, 两个独立的 SPR 感测通道用于测试待测样品。卤素光源产生的光束通过多模光纤射入毛细管, 光束在毛细管中传播并照射镜面 Ag 层和 Au/ITO 层, 强烈激发表面等离子体激元波, 并且引导在毛细管的内表面和外表面上的全内反射传输。最后, 用分光检测计 (HR4000, Ocean Optics, 英国) 测量获得共振波长。通过涂银内部光纤通道检测高 RI 液体样品, 当 RI 由 1.5255 增加到 1.5781 时, 共振波长发生显著蓝移。然而, 涂 Au/ITO 层的外通道对较低 RI 液体样品检测敏感。当 RI 由 1.3253 增加到 1.3726 时, 其共振波长发生显著红移, 且与内部通道分离。受益于更宽的 RI 检测范围, 表明该 SPR 传感器可用于具有宽 RI 测量特性的工业或生化环境。

2012 年, Shuai 等^[34]报道了一种基于多孔光子晶体光纤的高灵敏度双通道表面等离子体共振折

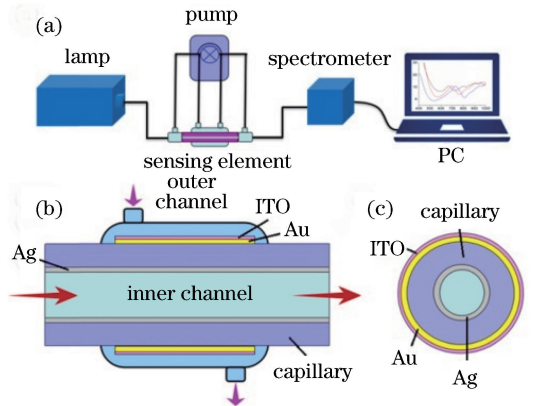


图 6 基于毛细管的 SPR 传感器的设计。(a)基于毛细管多层涂覆的 SPR 传感器的原理图;(b)毛细管感应区域的结构;(c)感测区域的横截面^[33]

Fig. 6 Design of capillary-based SPR sensor. (a) Schematic of capillary-based multilayer-coated SPR sensor; (b) structure of capillary sensing region; (c) cross-section of sensing region^[33]

率传感器, 如图 7 所示。该光纤结构能够将两个大孔径半圆型样品微流体通道集成于一根光纤。通过优化其结构参数, 有效的抑制光纤基模与高阶表面等离子体模式的共振, 同时左右两个通道保持了较强的独立性和稳定性。因此, 利用双通道多孔纤维 (DCHF-SPR) 微结构光纤传感器中基模的单个共振峰对折射率材料的敏感性移动来实现传感检测功能, 并且该 DCHF-SPR 传感器具有 3 种不同的工作模式。而且, 当工作于自参考模式时, 一个通道作

为参考通道,另一个通道作为测量通道,进而获得的最高平均折射率灵敏度为 7533 nm/RIU。并且, DCHF-SPR 折射率传感器的第二种工作模式同时

可以测量两种待测样品,此时左右两个通道都作为传感通道并填充不同折射率待测分析物,获得的最高折射率灵敏度为 10200 nm/RIU。

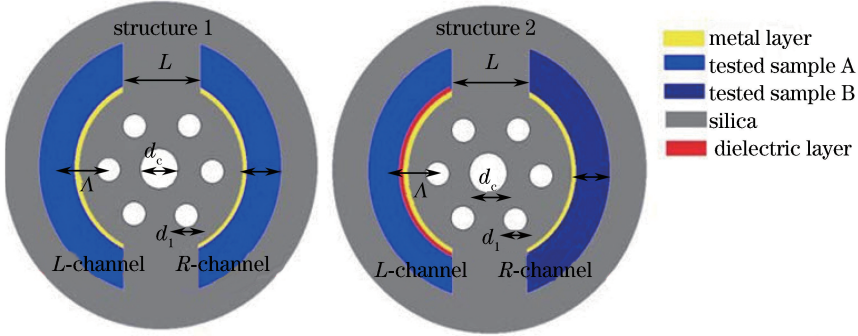


图 7 DCHF-SPR 传感器结构示意图。(a)结构 A,左、右通道结构相同; (b)结构 B,左、右通道结构不相同(左通道金属表面镀有高折射率介质层)^[34]

Fig. 7 Structural diagram of DCHF-SPR sensor. (a) Structure A with left and right channel structures being same; (b) structure B with left and right channel structures not being same (left channel metal surface coated with high refractive index dielectric layer)^[34]

如表 1 所示,对比描述了 D 型、液芯型、双通道、微流体插槽和选择性金属填充型光子晶体光纤传感器的优缺点。D 型光子晶体光纤传感器优点是液体样品可以直接流过外表面使得测试方法更简洁、便携,而缺点是对抛光和蚀刻技术的要求更精确而苛刻。液芯型光子晶体光纤传感器具有在有限测试光谱范围内可测量宽范围的折射率待测样品,但是实现精确填充存在较大的技术困难。双通道型光子晶体光纤折射率传感器可以实现多种工作模式且模式之间具有良好的独立性和稳定性,但是分通道填充待测样品存在较大的技术难度。微流体插槽型 SPR-PCF 折射率传感器能够实现多种分析物的瞬间检测,但是创建微流体要求高精度的微操作技术。选择性金属填充型光子晶体光纤折射率传感器具有较强的任意性选择填充优点,空气气孔可以充当液体分析物的流动通道,但是气孔尺度在微米量级给液体分析物的填充带来技术挑战性,金属涂覆层尺度纳米量级,致使镀膜技术也很难实现。以上各类型光子晶体光纤传感器优缺点的对比和总结,将会指导人们在不同的环境中选择合适的光子晶体光纤折射率传感器。总之,从实验角度来考虑,D 型、液芯型、双通道、微流体插槽和选择性金属填充型光子晶体光纤传感器都存在技术瓶颈问题,对于 D 型光子晶体光纤,已经有相对较系统的实验制备装置,但是实现精度的抛光仍需要探索。然而,对于开槽型和液芯型光子晶体光纤都需要特殊的镀膜技术手段和环境,目前采用气相沉积法进行镀膜探究,但是仍

处于技术攻关阶段。

表 1 主要的几类 PCF-SPR 传感器的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of main types of PCF-SPR sensors

Type of SPR-PCF	Advantage	Disadvantage	Structural diagram
D-shaped PCF	Low refractive index detectio, more simple detection, and high sensitivity	Accurate D-type polishing and microstructure etching are technically difficult	
Liquid core PCF	Measured in a limited spectral range, and wide refractive index test range	Precision liquid filling and metallization coating are challenging	
Microfluidic slot-type PCF	Multiple analyte transient detection	Microfluidic groove engraving and metallization coating are challenging	
Metal select filled PCF	Liquid filled venting channels are flexible	Liquid filling, structural preparation, and metallization coating are challenging	
Dual-channel PCF	Multiple independent, stable operation modes and tunable test range	Sub-channel filling, structural preparation, and metal coating are difficult	

表 2 主要总结和对比了几类光子晶体光纤传感器(如内镀金属膜型、石墨烯涂覆型、新 D 型、液芯型和双通道型)的主要工作参数。选取各类报道文献对光子晶体光纤折射率传感器的参数进行表述,金属镀膜型光子晶体光纤折射率传感器在折射率测试范围 1.46 ~ 1.53,获得的平均灵敏度为

2390 nm/RIU,分辨率为 3.33×10^{-5} 。石墨烯涂覆型光子晶体光纤折射率传感器^[1]在测试范围 1.33~1.36 获得的平均灵敏度为 3700 nm/RIU,分辨率为 4.6×10^{-5} RIU⁻¹。当折射率测试范围 1.20~1.29 时,D 型光子晶体光纤折射率传感器获得了 11055 nm/RIU 的灵敏度,分辨率高达 9.05×10^{-6} 。液芯 PCF-SPR 传感器在折射率测试范围 1.45~1.495 和 1.495~1.53 内,获得了灵敏度为

3700 nm/RIU 和 -3500 nm/RIU,分辨率分别为 2.7×10^{-6} RIU⁻¹和 -5.8×10^{-4} RIU⁻¹。双通道型 SPR 光纤折射率传感器在折射率测试范围 1.33~1.38 内,左通道和右通道分别获得了灵敏度为 6143 nm/RIU 和 4993 nm/RIU,分辨率为 1.45×10^{-5} 。如表 2 所示,发现 D 型光子晶体光纤可以获得最高的折射率平均灵敏度,而且获得了最宽的测试范围。

表 2 不同 SPR-PCF 折射率传感器结构参数表

Table 2 Structural parameters of different SPR-PCF refractive index sensors

Fiber structure	RI range	Average sensitivity / (nm·RIU ⁻¹)	Resolution / RIU ⁻¹	Reference
D-shaped PCF sensor	1.20~1.29	11055	9.05×10^{-6}	[16]
Graphene-coated optical fiber sensor	1.33~1.36	3700	4.6×10^{-5}	[19]
Liquid-core PCF-SPR sensor	1.45~1.495	3700	2.7×10^{-6}	[28]
	1.495~1.53	-5500	-5.8×10^{-4}	
Dual-channel SPR optical fiber sensor	1.33~1.38	Left: 6143 Right: 4993	1.45×10^{-5}	[31]
Metal-coated optical fiber sensor	1.46~1.53	2390	3.33×10^{-5}	[34]

4 结束语

综上所述,对 SPR-PCF 折射率传感器从低灵敏度到高灵敏度和从作用单一到多功能的特点进行系统概述。分析了几类表面等离子体共振型光子晶体光纤的实验制备方法和技术瓶颈。突出了 SPR-PCF 折射率传感器具有实时量化分析物浓度、高灵敏度和结构紧凑性等优点。强调了与传统棱镜 SPR 传感器相比,PCF 独特的中孔结构特性,并可将其作为填充感测微流液体的通道。总之,随着 PCF 制备和金属纳米粒子合成技术的逐渐发展,SPR-PCF 生物传感技术将日趋成熟。其在检测各种类型的化学和生物折射率分析物方面具有显著、潜在的应用价值,并将在医疗诊断、生物化学、环境监测和食品安全等领域获得重要应用。

参 考 文 献

- [1] Ke L T, Chen W Y, Zhang Y, *et al.* Optimizing design for sensitivity improvement of refractive index sensors based on photonic crystal waveguide [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 052304.
- 柯林佟, 陈卫业, 张洋, 等. 基于光子晶体波导的折射率传感器的灵敏度优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 052304.
- [2] Homola J, Dostálek J, Chen S F, *et al.* Spectral surface plasmon resonance biosensor for detection of staphylococcal enterotoxin B in milk[J]. *International*

Journal of Food Microbiology, 2002, 75(1/2): 61-69.

- [3] Wang L, Wan X M, Gao R, *et al.* Preparation and characterization of nanoporous gold film based surface plasmon resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0228002.
- 王丽, 万秀美, 高然, 等. 纳米多孔金膜表面等离子体共振传感器的制备与表征[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0228002.
- [4] Weiss M N, Srivastava R, Groger H, *et al.* A theoretical investigation of environmental monitoring using surface plasmon resonance waveguide sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 51(2/3): 211-217.
- [5] Choi H, Ko S J, Choi Y, *et al.* Versatile surface plasmon resonance of carbon-dot-supported silver nanoparticles in polymer optoelectronic devices [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 732-738.
- [6] Kajenski P J. Tunable optical filter using long-range surface plasmons[J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(5): 1537-1541.
- [7] Schildkraut J S. Long-range surface plasmon electrooptic modulator[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(21): 4587-4590.
- [8] Wang L C, Ng R J H, Dinachali S S, *et al.* Large area plasmonic color palettes with expanded gamut using colloidal self-assembly [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(4): 627-633.
- [9] Johnston K S, Karlsen S R, Jung C C, *et al.* New analytical technique for characterization of thin films

- using surface plasmon resonance [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1995, 42(4): 242-246.
- [10] Ma J, Yu H H, Xiong J G, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070006.
马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070006.
- [11] Zhu C H, Tan C, Wang Y, *et al.* Research on high sensitivity temperature and magnetic field sensor based on surface plasma resonance and mode coupling in photon crystal fibers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0310001.
朱晟昇, 谭策, 王琰, 等. 基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场与温度传感器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0310001.
- [12] Jorgenson R C, Yee S S. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1993, 12(3): 213-220.
- [13] Renn M J, Donley E A, Cornell E A, *et al.* Evanescent-wave guiding of atoms in hollow optical fibers [J]. *Physical Review A*, 1996, 53(2): R648.
- [14] Tsurutani B T, Brinca A L, Smith E J, *et al.* A statistical study of ELF-VLF plasma waves at the magnetopause [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(A2): 1270-1280.
- [15] Nelson R W, Krone J R, Jansson O. Surface plasmon resonance biomolecular interaction analysis mass spectrometry. 1. Chip-based analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 1997, 69(21): 4363-4368.
- [16] Chen X, Xia L, Li C. Surface plasmon resonance sensor based on a novel D-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 6800709.
- [17] Shi W H, You C J, Wu J. D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224221.
施伟华, 尤承杰, 吴静. 基于表面等离子体共振和定向耦合的 D 形光子晶体光纤折射率和温度传感器? [J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 224221.
- [18] Wu T S, Shao Y, Wang Y, *et al.* Surface plasmon resonance biosensor based on gold-coated side-polished hexagonal structure photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20313-20322.
- [19] Dash J N, Jha R. On the performance of graphene-based D-shaped photonic crystal fibre biosensor using surface plasmon resonance [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(5): 1123-1131.
- [20] Krepel D, Hod O. Physical properties of graphene nanoribbons: insights from first-principles studies [M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [21] Xavier J, Vincent S, Meder F, *et al.* Advances in optoplasmonic sensors-combining optical nano/microcavities and photonic crystals with plasmonic nanostructures and nanoparticles [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(1): 1-38.
- [22] Chen S S, Cai W W, Piner R D, *et al.* Synthesis and characterization of large-area graphene and graphite films on commercial Cu-Ni alloy foils [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(9): 3519-3525.
- [23] Wai P K A, Menyuk C R, Chen H H. Effects of randomly varying birefringence on soliton interactions in optical fibers [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(22): 1735-1737.
- [24] Hassani A, Skorobogatiy M. Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of biolayer thickness [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(8): 1550-1557.
- [25] Otupiri R, Akowuah E K, Haxha S, *et al.* A novel birefringent photonic crystal fiber surface plasmon resonance biosensor [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 1-11.
- [26] Villatoro J, Antonio-Lopez E, Zubia J, *et al.* Interferometer based on strongly coupled multi-core optical fiber for accurate vibration sensing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25734-25740.
- [27] Zhou S, Huang B, Shu X W. A multi-core fiber based interferometer for high temperature sensing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(4): 045107.
- [28] Zhang C B, Ning T G, Li J, *et al.* Refractive index sensor based on tapered multicore fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 33: 71-76.
- [29] Shuai B B, Xia L, Liu D M. Coexistence of positive and negative refractive index sensitivity in the liquid-core photonic crystal fiber based plasmonic sensor [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25858-25866.
- [30] Dash J N, Jha R. Graphene-based birefringent photonic crystal fiber sensor using surface plasmon resonance [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1092-1095.
- [31] Hassani A, Skorobogatiy M. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics [J].

Optics Express, 2006, 14(24): 11616-11621.

- [32] Rifat A A, Mahdiraji G A, Chow D M, *et al.* Photonic crystal fiber-based surface plasmon resonance sensor with selective analyte channels and graphene-silver deposited core[J]. Sensors, 2015, 15(5): 11499-11510.

- [33] Lu M D, Peng W, Liu Q, *et al.* Dual channel

multilayer-coated surface plasmon resonance sensor for dual refractive index range measurements [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8563-8570.

- [34] Shuai B B, Xia L, Zhang Y T, *et al.* A multi-core holey fiber based plasmonic sensor with large detection range and high linearity [J]. Optics Express, 2012, 20(6): 5974-5986.