

光学微腔增强的生物传感技术及其应用

文/杨大全

北京邮电大学信息与通信工程学院

近几十年来,光学生物传感技术发展非常迅速,被广泛应用于生物医疗研究、卫生保健、环境监测、国土安全,甚至实际战场。通常,光学生物传感器有两种基本的检测方案:荧光标记检测(fluorescence-based detection)和无标记检测(label-free detection)。其中,在无标记的检测中,被检测分子没有被荧光标记或者生物改性,而是以其自然的物理状态被检测。一方面,这种检测技术相对简单、价格低廉、无侵害性、响应快速、灵敏度高,允许定量分析和研究分子动力学及分子之间的相互作用;另一方面,这种无标记方法可用于在体的实时检测,具有损伤小和快速便捷等特点。

无标记的光学生物传感技术有很多种,包括表面等离子共振、光波导、光纤和光学微腔等。这些方案各有优缺点。其中,光学微腔可以在时间和空间维度上对光场能量进行约束,能将光子长时间局域在很小空间体积内,极大地增强了光与物质相互作用,已经成为微纳光学传感和前沿光子学研究的重要体系之一。常见的光学微腔^[1]包括法布里-珀罗微腔、回音壁模式微腔、光子晶体微腔等,如图1所示。其中硅基光子晶体纳米梁微腔具有超小的模式体积和较高的品质因子,能够极大地增强光与物质相互作用。同时,其结构紧凑,具有集成度高、CMOS兼容性高等优势,在片上生物传感与检测应用中具有极大潜力。

近几年来,基于光学微腔的无标记生物传感技术吸引了国际学术界广泛关注,不仅可以实现各种微腔环境物理参数传感,如温度、磁场、应力及陀螺仪等,而

	Fabry-Perot	Whispering gallery	Photonic crystal
High Q	 $Q: 2,000$ $V: 5 (\lambda/n)^3$	 $Q: 12,000$ $V: 6 (\lambda/n)^3$ $Q_{int}: 7,000$ $Q_{ext}: 1.3 \times 10^5$	 $Q: 13,000$ $V: 1.2 (\lambda/n)^3$
Ultra-high Q	 $F: 4.8 \times 10^5$ $V: 1,690 \mu\text{m}^3$	 $Q: 8 \times 10^9$ $V: 3,000 \mu\text{m}^3$	 $Q: \sim 10^6$ $V: \sim 10^{-1} (\lambda/n)^3$

图1 光学微腔的分类:法布里-珀罗微腔、回音壁模式微腔和光子晶体微腔

且被广泛运用于生物医学传感和临床医疗辅助诊断等应用基础研究领域。由于具有灵敏度高、成本低廉及器件小等独特优势,基于光学微腔增强的光学传感技术发展迅速,人们不仅展示了它们的待测物质超低浓度传感能力,也相继证明了它们具有纳米尺度单颗粒甚至单分子传感能力^[2-4]。目前已经达到了单个纳米颗粒、单个生物分子及单离子检测水平;并实现了非破坏性、无标记、实时片上单粒子传感,例如对SARS病毒、埃博拉病毒等的探测、对各种蛋白质分子和核苷酸小分子等的探测以及对空气中致病污染粒子的监测,甚至可以实现生物体原位信息监测。因此,该新型光学微腔增强的生物传感技术将为生物研究和医学诊疗提供前沿工具和技术手段,并有望实际应用于生物医学的传感检测以及临床疾病的辅助诊断中,在重大疾病的早诊早治、疾病防控及环境监测等方面具有重大意义。■

参考文献

- [1] Vahala K. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424: 839–846.
- [2] Yang D, Kita S, Liang F, et al. High sensitivity and high Q-factor nanoslotted parallel quadrabeam photonic crystal cavity for real-time and label-free sensing[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(6): 2034–2038.
- [3] Zhi Y, Yu X C, Gong Q, et al. Single nanoparticle detection using optical microcavities[J]. Advanced Materials, 2017, 29(12): 1604920.
- [4] Yang D, Wang A, Chen J H, et al. Real-time monitoring of hydrogel phase transition in an ultrahigh Q microbubble resonator[J]. Photonics Research, 2020, 8(4): 497–502.



杨大全,北京邮电大学信息与通信工程学院,副教授,博士生导师。研究方向为微纳光学传感新技术与精准检测。

E-mail: ydq@bupt.edu.cn