

高性能光学生物传感器研究

王星龙 姚泽文 赵浩君 马季*

辽宁石油化工大学理学院, 辽宁 抚顺 113001

摘要: 针对传统表面等离子体共振光学生物传感器存在金属欧姆损耗大、共振峰宽、会淬灭荧光分子等固有缺陷, 本文研究基于布洛赫表面波的一维光子晶体高性能无标记光学生物传感器。分别探究S极化光与P极化光条件下传感器对待测溶液折射率变化的响应特性。仿真结果表明: S极化模式下角度灵敏度为 92 deg/RIU, 共振半高宽极小, 品质因子高, 传感优值FOM可达 7076.92 RIU⁻¹; P极化模式角度灵敏度达到 450 deg/RIU, 但共振半高宽较大, FOM为 331.86 RIU⁻¹。S极化凭借极高的品质因子获得优异传感性能, 适合靶向分子引起溶液折射率发生显著变化时的高精度检测。

关键词: 光子晶体; 光学传感; Bloch 表面波; 高精度检测

DOI: 10.64649/yh.jydk.issn3080-2660.202610042

0 引言

疾病早期诊断与治疗监测对检测技术的灵敏度、速度和成本提出了越来越高的要求, 生物传感器因此在临床医学、食品安全和环境监测等领域成为持续研究的热点。在诸多传感原理中, 光学检测不接触样本、响应迅速、可重复使用, 且易于与微流控和便携设备集成, 受到广泛关注。与依赖荧光或酶标记的方法相比, 无标记光学传感通过直接监测界面折射率、薄膜厚度等光学参量的变化来反映生物分子的结合过程, 省去了标记带来的样品前处理、试剂消耗和信号漂移, 更适合在资源有限的现场开展即时检测^[1]。表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 是无标记光学传感中发展最成熟的一支, 通过棱镜耦合等配置激发金属膜表面的表面等离子体激元, 依靠其对界面折射率变化的敏感响应来表征分子结合, 已在生物分子相互作用分析、药物筛选和高通量检测等领域得到广泛应用。然而, SPR 依赖金属薄膜这一结构前提也带来固有局限: 金属的欧姆损耗较大, 使共振峰明显偏宽, 能量在界面处耗散较快, 制约了灵敏度和检测极限的进一步压低; 金属表面还会淬灭邻近荧光分子的发光, 使依赖荧光读出的检测模式大打折扣。这些不足促使研究者把目光转向损耗更低的介电材料体系, 由介电多层结构支持的光子晶体表面电磁波因此进入视野^[2]。与金属相比, 介电材料吸收损耗低, 能够维持较长传播距离和较高品质因子, 且不存在金属的淬灭效应, 被视为有望克服上述瓶颈的一类新平台。这一方向的物理渊源可追溯至固体物理中的表面态: 早在量子力学建立初期, 研究者便发现周期性势场在表面截断处可以容纳局域化的电子态, 这一思想其后被移植到电磁领域, 用于理解介电多层结构界面处出现的表面电磁模式。

光子晶体是介电常数在空间周期性调制的人工结构, 最简单的一维形式由高低折射率材料交替堆叠而成, 折射率调制使光的传播在禁

带内被阻断; 当多层结构在表面被截断时, 界面处可以束缚一类表面电磁模, 即布洛赫表面波 (Bloch surface wave, BSW)。入射光满足共振条件时与光子晶体能带边缘发生耦合, 电磁场被显著局域在光子晶体与待测介质界面附近, 场强获得增强, 从而放大界面处发生的生物识别信号^[3]。BSW 在垂直于界面的方向上呈指数衰减的倏逝场分布, 其探测深度由界面附近介质的介电性质决定, 因此对表面发生的分子吸附、构象变化十分敏感, 这正是其能够用于生物识别检测的物理基础^[4]。与金属表面的 SPR 相比, BSW 依托全介电结构, 几乎不存在欧姆损耗, 共振线宽窄、品质因子高, 传播长度可在较大范围内调节乃至达到毫米量级; 同时避免了金属对荧光分子的淬灭, 因此既适合以折射率为读数的无标记传感, 也适合荧光增强型检测。在荧光增强型检测中, BSW 不仅增强发光的局域场, 还能重新分配发射光的空间分布, 使荧光信号向收集方向集中, 提高信号提取效率, 这一特性对低浓度标志物的检测尤为有利。通过对周期数、膜层厚度和表面终止层的工程设计, BSW 的色散关系可以被精细调控, 进而匹配不同波长的检测需求; 一维结构又具备薄膜制备工艺成熟、成本较低的优点, 为传感芯片的批量制造提供了便利。同时, BSW 传感所需的激发与读出装置可与成熟的棱镜耦合、显微系统兼容, 降低了对专用设备的要求。

1 研究方法

根据 BSW 的激发条件可以给出传感器灵敏度的解析表达式, 然而, 待测溶液内的生物分子浓度的变化会打破这种平衡, 进而导致阻抗失配不为零。阻抗失配是外部变量待测溶液折射率 n_{bio} , 探测信号入射角 θ 以及探测信号波长 λ 的函数, 写成表达式为

$$Z_s = \frac{\partial Z_s}{\partial n_{bio}} \Delta n_{bio} + \frac{\partial Z_s}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial Z_s}{\partial \theta} \Delta \theta \quad (1)$$

我们知道阻抗失配主要来自于上式中的第

一项, 为了确保阻抗重新匹配, 需改变入射波长或入射角度使之重新匹配。

利用传输矩阵法计算该结构反射谱, 根据电磁场在边界的连续性条件我们可以得到各单层介质两侧电磁场所对应的传输矩阵为

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(k_i d_i) & -\frac{i \sin(k_i d_i)}{F_i} \\ -i F_i \sin(k_i d_i) & \cos(k_i d_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

总的传输矩阵可写为

$$M = \Pi M_i = (M_1 M_2)^N M_C = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $M_i (i=1,2,C)$ 表示介质的传输矩阵。总的传输矩阵即为入射场和出射场的电磁关系矩阵, 由此我们可以得到该结构的反射率为

$$R = \left| \frac{(M_{11} + M_{12} F_{bio}) F_0 - (M_{21} + M_{22} F_{bio})}{(M_{11} + M_{12} F_{bio}) F_0 + (M_{21} + M_{22} F_{bio})} \right|^2 \quad (4)$$

2 光学生物传感器性能

本文以棱镜耦合一维光子晶体为例展开研究, 棱镜是折射率为 $n_0=1.445$ 的石英玻璃, 截断的一维光子晶体是由高折射率材料 $\text{Ge}(n_1=4.3)$ 和低折射率材料 $\text{ZnSe}(n_2=2.46)$ 交替排列而成的, 排列周期 $N=6$ 。在待测溶液 ($n_{bio}=1.33$) 和光子晶体之间是缓冲层 $\text{ZnS}(n_3=2.28+0.0002i)$, 各层介质的厚度分别为 $d_1=163\text{nm}$, $d_2=93\text{nm}$, $d_3=615\text{nm}$ 。传感器表面是非常光滑且稳定的 ZnS , 非常有利于制备和清洁, 这在某种程度上也降低了生产成本。在下面的计算中, 我们均以光子晶体和缓冲层的界面为参考平面。

根据该结构反射率计算公式, 我们计算了等频型生物传感器 BSW 共振模对待测生物溶液浓度变化的响应, 结果如图 1 所示。图 1(a) 对应的入射光为 S 极化光, 入射波长选为 $\lambda_0=1500\text{nm}$ 。假设待测溶液折射率从 1.329 到 1.332 以 0.001 为间隔均匀变化。我们给出了 BSW 对待测溶液折射率微小变化的响应, 我们看到 BSW 共振模所对应的共振角度均匀向大角度方向移动, 共振角度分别为 $\theta_1=66.954\text{deg}$ ($n_{bio}=1.329$), $\theta_2=67.045\text{deg}$ ($n_{bio}=1.330$), $\theta_3=67.137\text{deg}$ ($n_{bio}=1.331$), 以及 $\theta_4=67.230\text{deg}$ ($n_{bio}=1.332$)。研究结果表明每当待测溶液折射率变化 0.001, BSW 共振模所对应的共振角度变化 0.013deg 。因此, 该等频型生物传感器的角度灵敏度 $S_\theta=92\text{deg/RIU}$ 。而 BSW 共振模的 FWHM 平均值为 0.013deg 。根据 FOM 的计算式可得该生物传感器 P 极化光的传感性能 $\text{FOM}=7076.92\text{RIU}^{-1}$ 。我们发现虽然该条件下的角度灵敏度不是很大, 但极高的 bsw 共振模品质因子导致了该生物传感器极高的传感性能。

仍然在该结构框架下, 我们计算了 P 极

化光对待测溶液变化的响应, 如图 1(b) 所示。需要说明的是在这里我们选取的探测信号波长 $\lambda_0=1589\text{nm}$ 。我们看到 BSW 共振模所对应的共振角度均匀向大角度方向移动, 共振角度分别为 $\theta_5=87.034\text{deg}$ ($n_{bio}=1.329$), $\theta_6=87.405\text{deg}$ ($n_{bio}=1.330$), $\theta_7=87.839\text{deg}$ ($n_{bio}=1.331$), 以及 $\theta_8=88.384\text{deg}$ ($n_{bio}=1.332$)。我们发现每当待测溶液折射率变化 0.001, BSW 共振模所对应的共振角度变化 0.045deg 。因此, 该等频型生物传感器的角度灵敏度 $S_\theta=450\text{deg/RIU}$ 。而 BSW 共振模的 FWHM 的平均值为 1.356deg 。根据 FOM 的计算式可得该生物传感器 P 极化光的传感性能 $\text{FOM}=331.86\text{RIU}^{-1}$ 。

上述计算结果表明对于 S 极化光虽然角度灵敏度一般, 即对待测溶液的微小变化敏感度差, 但 BSW 共振模的品质因子极高, 所以导致了很高的生物传感性能。可见该传感器适合靶向分子对生物溶液折射率影响较大的情况, 极高传感性能可保证在这种情况下的精确测量。

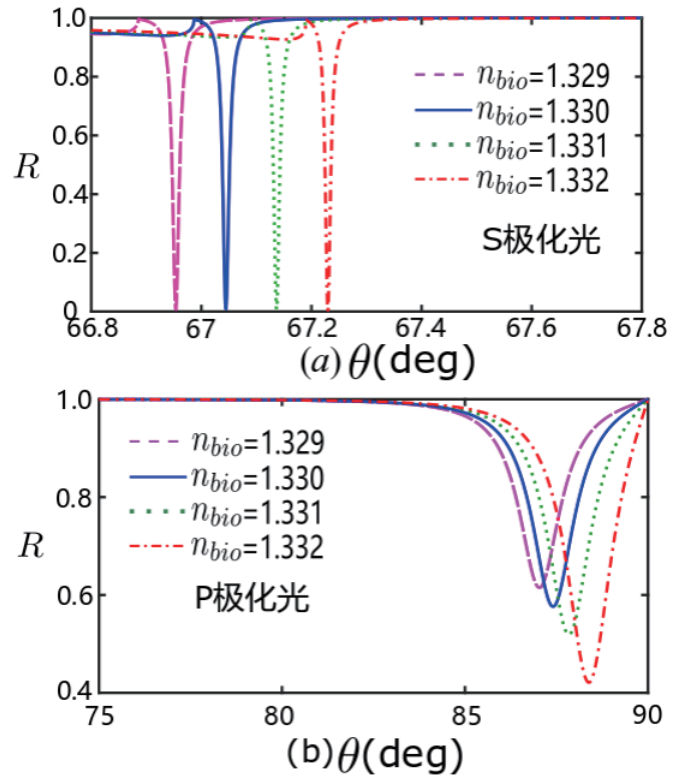


图 1 BSW 共振模对待测溶液变化的响应。(a) 入射光为 S 极化光, 探测信号波长 $\lambda_0=1500\text{nm}$, 共振角度分别为 $\theta_1=66.954\text{deg}$ ($n_{bio}=1.329$), $\theta_2=67.045\text{deg}$ ($n_{bio}=1.330$), $\theta_3=67.137\text{deg}$ ($n_{bio}=1.331$), 以及 $\theta_4=67.230\text{deg}$ ($n_{bio}=1.332$)。 (b) 入射光为 P 极化光, 探测信号波长 $\lambda_0=1589\text{nm}$, 共振角度分别为 $\theta_5=87.034\text{deg}$ ($n_{bio}=1.329$), $\theta_6=87.405\text{deg}$ ($n_{bio}=1.330$), $\theta_7=87.839\text{deg}$ ($n_{bio}=1.331$), 以及

$\theta_8=88.384\text{deg}(n_{\text{bio}}=1.332)$ 。

3 结论

本文构建了棱镜耦合一维光子晶体布洛赫表面波生物传感模型,利用传输矩阵法对传感器反射谱开展仿真计算,并对比研究 S、P 两种偏振光入射下的传感性能。研究表明, S 偏振模式下传感器角度灵敏度虽仅为 92deg/RIU ,但共振半高宽小、品质因子极高, FOM 可达 7076.92RIU^{-1} ,适用于靶向分子引起溶液折射率变化较大时的高精度检测,而 P 偏振模式

角度灵敏度可达 450deg/RIU ,但其共振峰展宽明显, FOM 仅 331.86RIU^{-1} ,综合传感性能弱于 S 偏振,由此可见偏振模式会显著影响 BSW 传感器的整体传感表现,高角度灵敏度并不代表综合传感性能优异,共振峰的品质因子对 FOM 起决定性作用,后续可通过优化光子晶体膜层厚度、周期数及终止层结构进一步调控 BSW 色散特性,提升传感器检测极限,推动该类光学生物传感器在临床医学、现场快速检测领域的实际应用。

参考文献:

- [1] 赵欣瑜,江兴方,阮志强,张磊。一种检测弱磁场的光纤传感器的研究与仿真[J].应用光学,2024,45(4):873-878.
- [2] 刘海,白冰冰,张砚曾,等.基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J].中国激光,2020,47(4):210-216.
- [3] SUN LULU, YANG ZIYI, MA WANYU et al., Dual-parameter fiber optic surface plasmon resonance sensor with narrow fwhm based on an incidence angle adjusting method[J]. Optics Express, 2024, 32(21):37480-37491.
- [4] 李志全,何家欢,王亚娟,等.基于 Au/ITO 纳米复合材料的自参照 SPR 传感器[J].光子学报,2016,45(12):1228002-1228008.

作者简介: 王星龙(2001.04—),男,蒙古族,内蒙古通辽人,本科生,研究方向:光子晶体传感器。

马季(1989.04—),男,汉族,吉林长春人,博士研究生,教授,研究方向:微纳光学。

项目信息: 辽宁石油化工大学生创新创业训练计划项目: Bloch 表面波光场调控技术及其传感应用研究(项目编号: 202510148031); 高性能光学传感器研究(项目编号: X202510148182)。