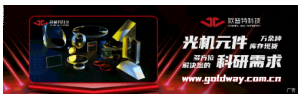
OEA封面丨从器件指标到信息保真度：MIMD框架重塑纳米光子生物传感

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/43190.html

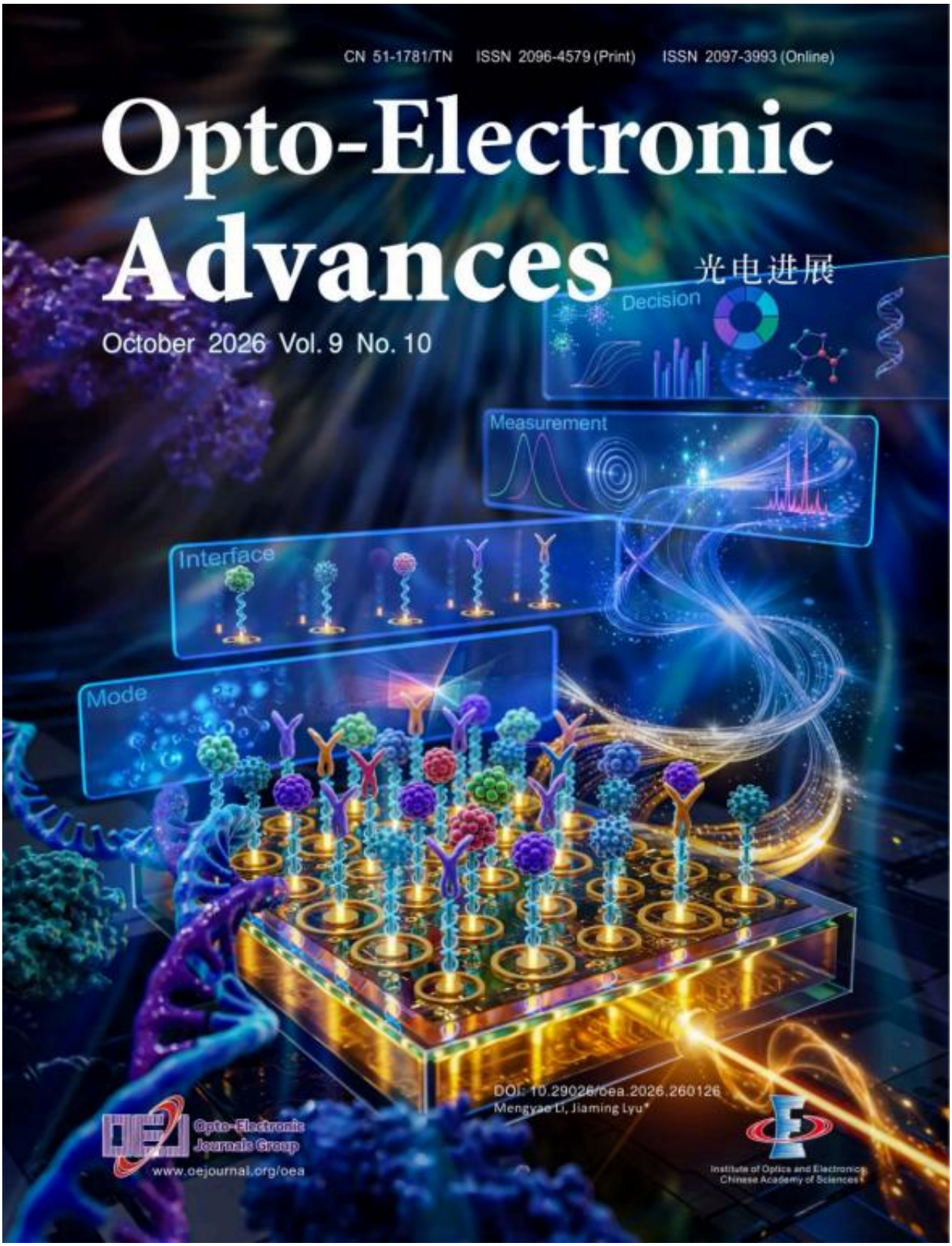
本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

OEA封面丨从器件指标到信息保真度：MIMD框架重塑纳米光子生物传感。





Opto-Electronic Advances封面论文推荐北京信息科技大学吕嘉明研究团队提出了一个新的系统性理解框架：Mode – Interface – Measurement – Decision（MI MD），即光学模式—生物界面—测量读出—决策判断四层框架。该框架认为，纳米光子生物传感的性能不应只由单个器件指标决定，而应由生物信息在整个传感链条中的保真传递能力决定。通过这一框架重新梳理了SPR、LSPR、SERS、光子晶体传感器、超表面和超材料生物传感等主要平台的发展逻辑。



封面文章 Li MY, Lyu JM. From device metrics to information fidelity: reframing nanophotonic biosensing through mode – interface – measurement – decision. Opto- E lectron A dv 9, 260126 (2026).

作者：李梦瑶、吕嘉明*

*通信作者

研究背景

生物传感技术的核心目标，是把人体、环境或生命体系中的分子识别事件转化为可以被仪器读出和分析的信号。例如，疾病标志物、核酸片段、蛋白质、细胞因子或病原体等目标分子，本身往往尺寸极小、浓度极低，并且存在于血清、唾液、组织液等复杂背景中。如何在复杂环境下准确识别这些微弱的分子信息，是精准诊断、公共卫生监测、食品安全和环境检测等领域长期关注的重要问题。

光学生物传感由于具有非接触、响应快、抗电磁干扰能力强、可实现无标记检测等优势，已经成为生物检测领域的重要方向。其中，纳米光子生物传感通过表面等离激元、局域等离激元、光子晶体、超表面和超材料等微纳结构，将光场限制在远小于传统光学尺度的空间内，从而显著增强光与分子的相互作用。当目标分子结合到传感表面时，会引起局部折射率、散射、相位、拉曼信号或图像强度等变化，传感器便可以通过这些光学响应反推出分子的存在、浓度或类别。

过去二十多年中，纳米光子生物传感取得了快速发展。表面等离激元共振（SPR）
建立了经典的实时、无标记检测模式；
局域表面等离激元共振（LSPR）进一步把检测体积压缩到纳米尺度；
表面增强拉曼散射（SERS）使传感器能够获得更具分子特异性的指纹 信息；
光子晶体、介质超表面和超材料则为高通量、 阵列化、
图像化和多维光学读出提供了新的平台。

然而，随着研究深入，单纯追求器件层面的高灵敏度、高品质因子、窄线宽或低检测限，已经不足以完整评价一个生物传感系统的实际性能。一个传感器即使在理想实验条件下具有很高的光学响应，也可能在真实样品中受到分子传输、表面非特异吸附、界面稳定性、背景漂移、仪器噪声和数据解释方式等因素限制。如何保证生物相关信息在这个过程中被有效生成、稳定传递、准确读出并最终转化为可靠判断，是推动纳米光子生物传感走向实用化的关键。

本文亮点

针对上述问题， 北京信息科技大学吕嘉明研究团队提出了一个新的系统性理解框架：
Mode – Interface – Measurement – Decision（MI MD），
即光学模式—生物界面—测量读出—决策判断 四层框架。该框架认为
，纳米光子生物传感的性能不应只由单个器件指标决定
，而应由生物信息在整个传感链条中的保真传递能力决定。文章通过这一框架重新梳理了 SPR
、 LSPR 、 SERS 、光子晶体传感器 、超表面和超材料生物传感等主要平台的发展逻辑。

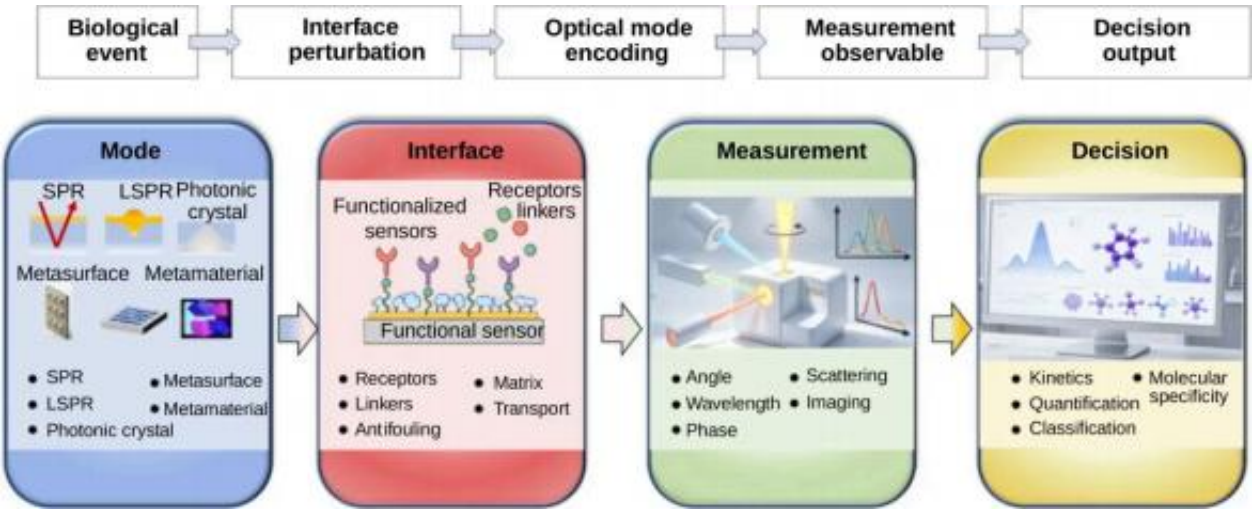


图 1 纳米光子生物传感的 MI MD 框架。 生物事件并非被直接检测，而是在光学模式—生物界面—测量读出—决策判断四个耦合层次中逐步转化为可分析信息。光学模式层定义光场的空间和光谱结构；生物界面层决定生物识别如何转化为局部光学扰动；测量读出层通过波长、角度、强度、相位、散射、拉曼或成像等方式提取信号；决策判断层则给出最终推断结果

在 Mode 层，传感器需要考虑光场能量分布在哪里、是否能够被目标分子有效扰动、局域场是否真正暴露在待测环境中。高品质因子和强局域场固然重要，但如果目标分子难以进入光场热点区域， 或者结合位置与光学敏感区域不匹配，传感性能仍会受到限制。

在 Interface 层，生物界面并不是简单的表面修饰层，而是决定分子识别能否转化为有效光学扰动的关键环节。受体固定、连接分子、抗污染层、分子取向、空间位阻、传质过程和非特异吸附等因素，都会显著影响实际检测效果。

在 Measurement 层，传感器并不是只要产生光学变化就足够，还必须选择合适的读出方式。角度漂移、波长漂移、相位变化、干涉条纹、拉曼强度、散射谱和图像化读出等方式，决定了系统的信噪比、动态范围、抗漂移能力、复用能力和仪器复杂度。

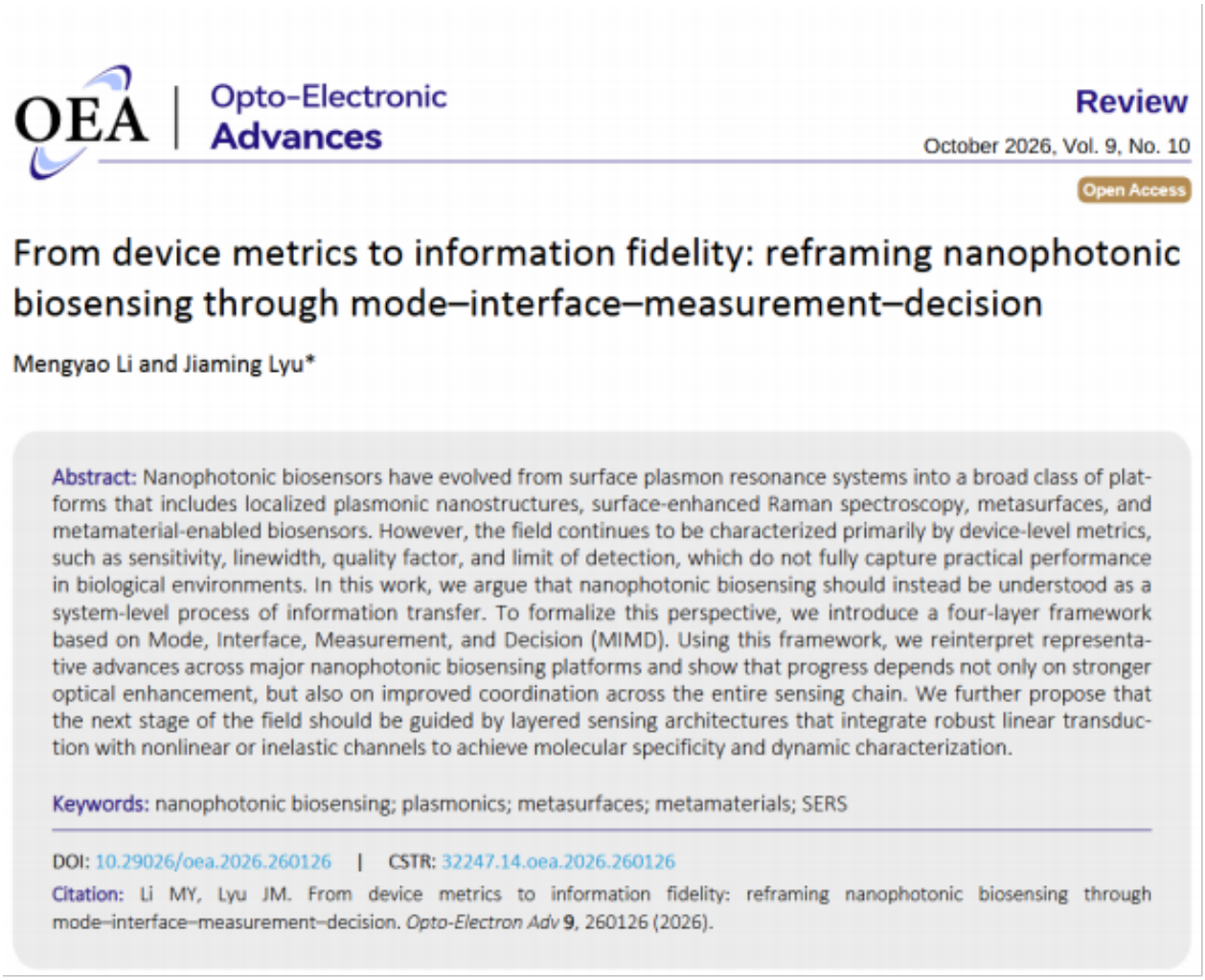
在 Decision 层，传感器最终要服务于具体任务，包括浓度估计、动力学分析、分子识别、样品分类或任务相关判断。不同任务对前端光学模式、界面设计和测量方式的要求并不相同。例如，用于浓度定量的系统更依赖稳定标定曲线；用于分子识别的系统则需要更丰富的光谱、图像或拉曼特征。

在此基础上，纳米光子生物传感正在从传统的线性折射率响应，走向多层级信息读出。传统线性传感通道适合实现稳定、快速、可扩展的前端检测，但对于分子特异性和动态机制分析仍存在不足。未来的生物传感系统可能会将线性检测与 SERS、二次谐波、荧光相关光谱、图像化读出和数据驱动分析相结合，形成层级化、多通道、任务导向的信息处理架构。

文章的重要意义在于，将纳米光子生物传感的评价标准从器件指标拓展到信息保真度。这种视角有助于解释为什么某些具有优异光学指标的传感器在真实生物样品中表现并不理想，也为未来传感系统设计提供了更完整的思路：不仅要优化光学结构，还要协同设计生物界面、测量架构和数

据决策方式。对于疾病早筛、即时检测、环境监测、食品安全和个性化医疗等应用而言，这种系统级设计理念有望推动纳米光子生物传感从实验室高灵敏演示走向稳定、可靠和可推广的实际应用。

该工作以 From Device Metrics to Information Fidelity: Reframing Nanophotonic Biosensing through Mode – Interface – Measurement – Decision 为题作为封面文章发表在 Opto-Electronic Advances 2026 年第 10 期。



OEA | Opto-Electronic Advances

Review

October 2026, Vol. 9, No. 10

Open Access

From device metrics to information fidelity: reframing nanophotonic biosensing through mode–interface–measurement–decision

Mengyao Li and Jiaming Lyu*

Abstract: Nanophotonic biosensors have evolved from surface plasmon resonance systems into a broad class of platforms that includes localized plasmonic nanostructures, surface-enhanced Raman spectroscopy, metasurfaces, and metamaterial-enabled biosensors. However, the field continues to be characterized primarily by device-level metrics, such as sensitivity, linewidth, quality factor, and limit of detection, which do not fully capture practical performance in biological environments. In this work, we argue that nanophotonic biosensing should instead be understood as a system-level process of information transfer. To formalize this perspective, we introduce a four-layer framework based on Mode, Interface, Measurement, and Decision (MIMD). Using this framework, we reinterpret representative advances across major nanophotonic biosensing platforms and show that progress depends not only on stronger optical enhancement, but also on improved coordination across the entire sensing chain. We further propose that the next stage of the field should be guided by layered sensing architectures that integrate robust linear transduction with nonlinear or inelastic channels to achieve molecular specificity and dynamic characterization.

Keywords: nanophotonic biosensing; plasmonics; metasurfaces; metamaterials; SERS

DOI: 10.29026/oea.2026.260126 | CSTR: 32247.14.oea.2026.260126

Citation: Li MY, Lyu JM. From device metrics to information fidelity: reframing nanophotonic biosensing through mode–interface–measurement–decision. *Opto-Electron Adv* **9**, 260126 (2026).

Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China.
*Correspondence: JM Lyu, E-mail: jm_lyu@163.com

研究团队简介

北京信息科技大学吕嘉明研究团队是一支朝气蓬勃、锐意进取的创新型研究队伍。核心成员包括博士生3名，研究生3名。团队专注主要研究方向为：超表面材料的设计与检测技术，微纳材料加工，太赫兹与红外检测技术等前沿领域。致力于解决国家重大需求、行业关键技术难题。

近年来团队已在 Opto-Electronic Advances、 Light、 PhotoniX等高水平期刊发表 SCI 论文多篇（含 Top 0. 1%高被引热点论文一篇） 。相关技术成果荣获教育部发明一等奖、

中国光学工程学会发明一等奖、 日内瓦国际发明银奖项。 主持或参与国家级项目、省部级重大项目、成果转化项目等的课题 7 项，总经费超千万元
，产生了显著的经济与社会效益。



团队针对实验结果进行探讨



吕嘉明教授于实验室



本文两位作者于实验室

长按识别此二维码，直达全文
来源：光电期刊

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发