基于4D光学微谐振器的高精度pH检测

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/30966.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！

基于4D光学微谐振器的高精度pH检测。



图1：基于光学微谐振器的pH传感器示意图

导读

精确的酸碱度（pH）检测在水质监测、环境分析、分析化学、生物医学和药物研究等领域中具有重要意义。传统的pH检测方法，如使用离子比色法的pH试纸和使用电化学法的pH计，已在实验室中得到广泛应用。pH试纸提供了一种便捷、低成本的选择，但其精度较低，通常只能提供约1 pH单位的精度。相比之下，电化学pH计精度更高，能够达到0.001 pH单位的分辨率，但存在易碎、对温度变化敏感、需要频繁校准等缺点。光学pH传感器作为传统电化学方法的替代方案，具有紧凑、高灵敏度、抗电磁干扰、支持远程监测和最小化侵入性等优势。光学检测方法，如吸收或荧光传感器，提供了比传统电化学方法更高的选择性和灵敏度。然而，这些方法仍然受限于温度、离子强度等因素的影响。

近期，来自德国波鸿鲁尔大学的Andreas Ostendorf团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Two-photon polymerization of optical microresonators for precise pH sensing的研究论文。研究人员提出了一种基于4D光学微谐振器阵列的高精度pH检测方法，通过双光子聚合技术制造的多路复用传感器能够在接近pH 7.4的环境中精确检测微小的pH变化，展示了比单一微共振腔更优越的性能和更高的检测灵敏度。

光学微谐振器由于其能够将电磁场局限在介质材料内，形成闭合的圆形回路，并通过低能耗的回音壁模式（Whispering Gallery Mode, WGM）干涉共振现象，具有高品质因子(Q因子)，使其在传感器领域得到了广泛应用。在环境或被测物质变化（如温度或生物分子结合）时，WGM共振的光谱会发生变化，如共振线移位、线宽展宽或模式分裂，这些变化可作为传感信号进行检测。近

年来，借助等外点技术、等离子体光子方案等手段，WGM检测方法的灵敏度得到了显著提升。此外，深度学习算法的应用使得多路复用检测方案成为可能，可以同时监测数百甚至数千个共振腔。基于微谐振器的pH传感器在多种物理化学参数检测中表现出色，尤其是通过涂覆pH敏感材料或功能化共振器内表面，使得微谐振器能够通过折射率变化进行高精度的pH值测量。

双4D微谐振器的设计与制造

研究人员利用双光子聚合技术成功实现了双光学微谐振器传感结构的制造，并通过控制它们之间的间距以确保实现光学耦合，结构模型如图2a所示。为减少微腔曲率方向上的辐射损失，单个4D微腔体的主半径优化为21 μm，副半径为1.8 μm。每个微环体通过支撑元件固定在一起，确保其长期稳定性，并且它们之间保持一定的间隙。为了实现光学耦合，间隙范围被设置在600 nm至3 μm之间，具体值在制造过程中进行了优化。此外，为了降低表面粗糙度及由此引起的散射损失，特别是由聚合物层交联产生的损失，并精确控制两个谐振器之间的距离，模型中引入了一种柔性支撑结构。这种支撑结构使得微谐振器在聚合和传感阶段能够以不同的对称轴方向进行分层聚合，从而提高了制造精度和光学性能。

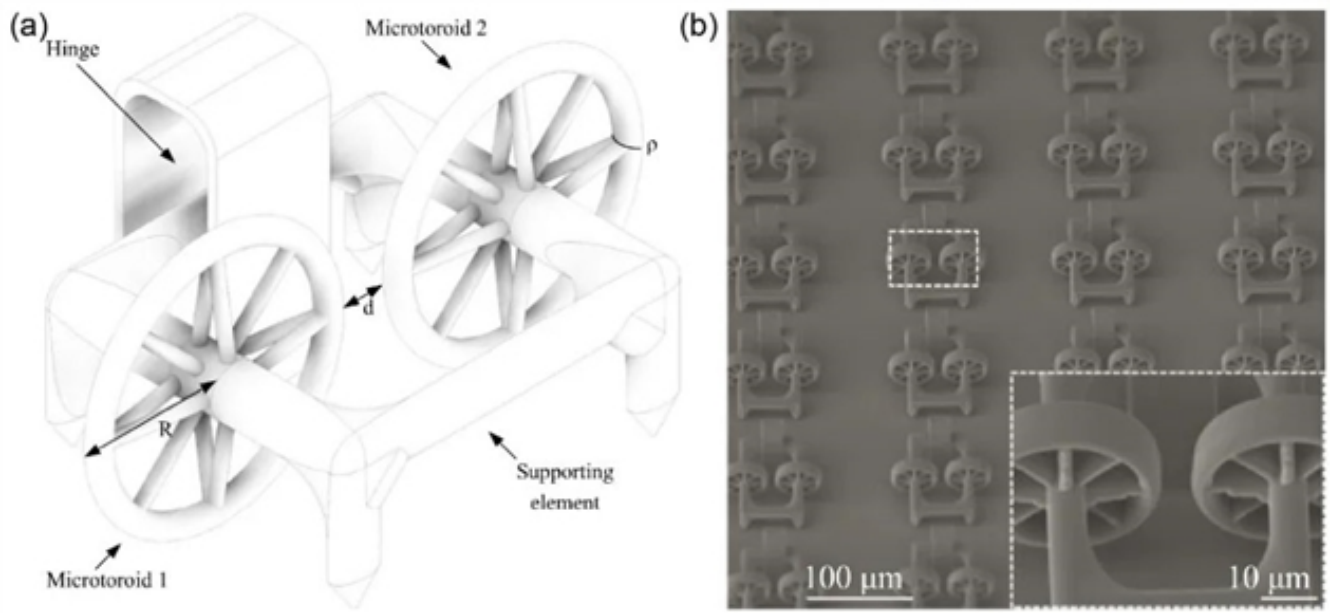


图2：双4D微谐振器的结构设计和阵列结构的电子显微成像图

双4D微谐振器的pH检测

随后，研究人员重点分析了由pH值变化引起的双4D微谐振器的光谱变化。由pH值变化引发的每个微环体的膨胀和收缩，导致腔体之间的间隙发生变化，从而影响它们之间耦合模式的条件。在此过程中，单个WGM在光谱中的突出程度根据初始条件的不同而有所增加或减少。由于阵列中腔体间间隙的自然差异，部分双4D微谐振器可能无法实现光学接触。因此，在整个样品阵列中，只有那些在反向辐射光斑中信号显著的结构，即信号强度超过噪声水平三倍标准差的结构，才被纳入分析。基于上述考虑，研究人员在磷酸盐缓冲液与氢氧化钠混合的情况下，对pH值进行最小增量（0.01）的测量，测试结果如图3所示。

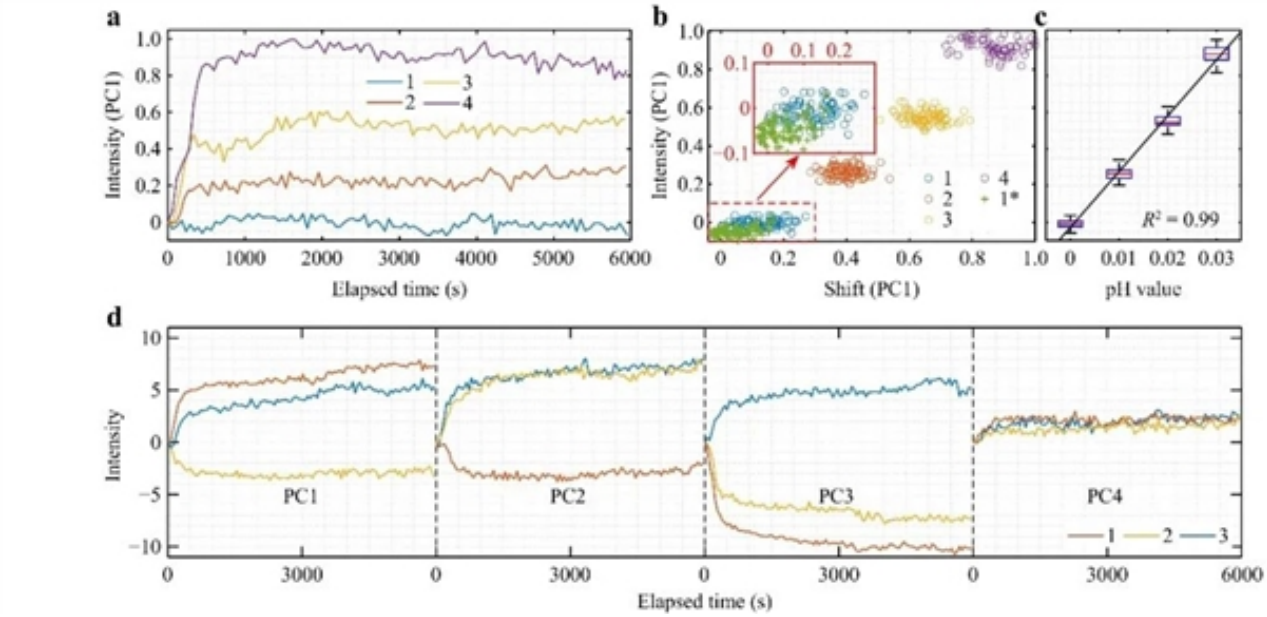


图3：双4D微谐振器在pH=7.4附近的光谱响应

在测试过程中，所有信号点根据动态变化程度被划分为两组。第一组信号表现出明显的动态变化，随着pH值的变化，信号饱和值逐步增大，表明光谱模式结构的变化愈加显著。结合广义光谱偏移，基于模式强度的响应在每次pH值变化0.01时形成了明显的分组，并且这些分组能够清晰地区分开来。基于这些分析，研究人员通过广义模式强度的灵敏度估算了双4D微谐振器的理论检测限。通过线性模型描述广义模式强度与pH值变化之间的关系，并计算出相关参数和标准差。测试结果表明，该传感器能够有效地检测到0.003单位的pH值变化。双4D微谐振器阵列传感的谐振信号如图4所示。

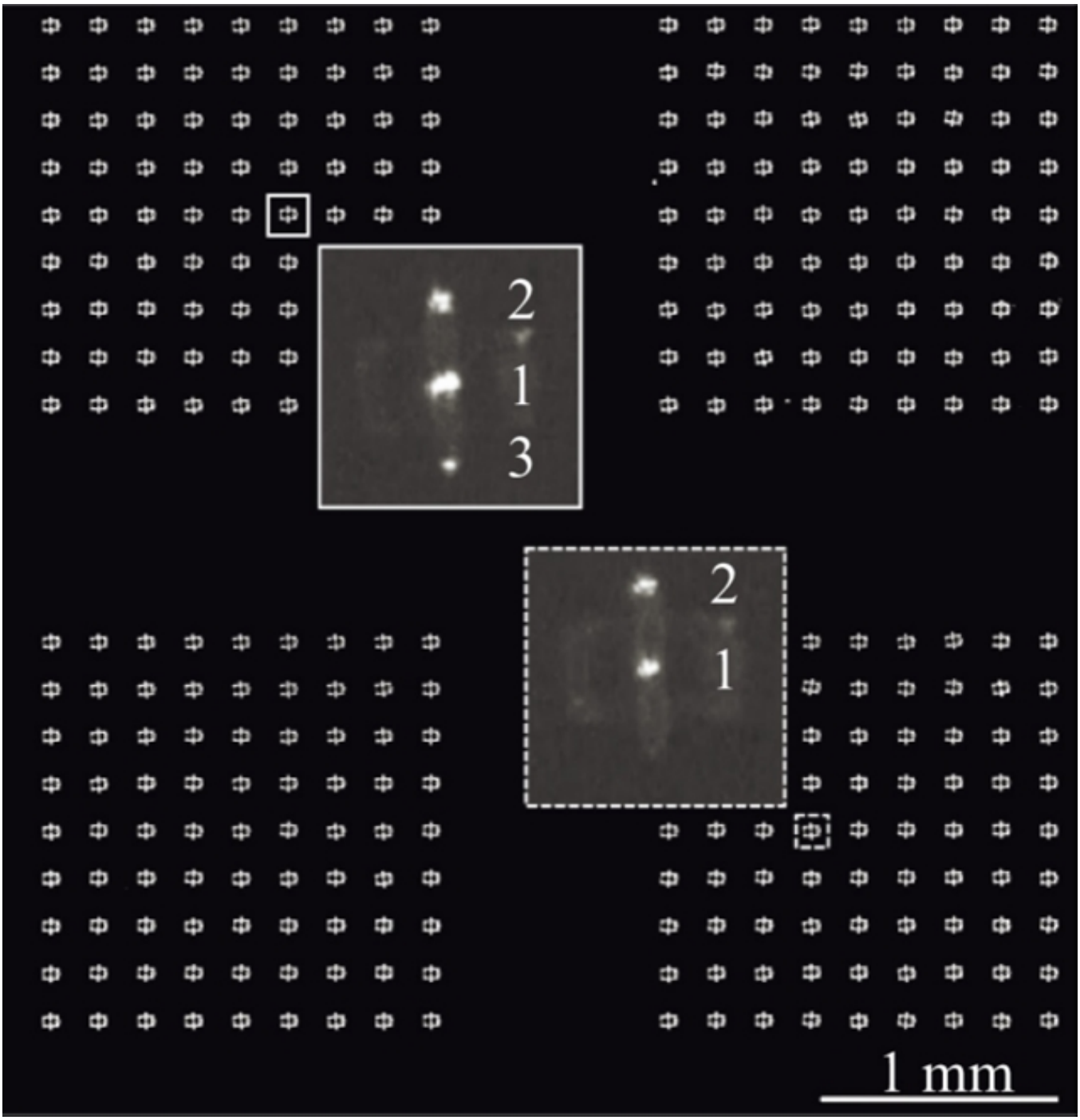


图4四组双4D微谐振器阵列传感器。插图展示了具有三个和两个感测点的耦合（实线）和独立（虚线）环形谐振信号

总结与展望

综上所述，研究人员提出了一种基于4D光学微谐振器阵列的高精度pH变化追踪方法，实现了对生化溶液中微小pH波动的精确监测。利用双光子聚合技术制造的单个或双4D光学微谐振器阵列传感器可以具备数百个紧密集成的相似结构，可实现多点协同的pH监测。实验结果表明，4D光学微谐振器中的检测限能够达到0.003 pH单位，显示出极高的灵敏度，是目前最敏感的pH检测方案之一。此外，凭借其在同一基板上与其他类型微谐振器或功能单元的优异集成能力，能够以较

低成本在多路成像平台中高效运行，为多参数生化传感提供了一种具有显著优势的解决方案。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2024.054

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：Andreas Ostendorf 来源：《光：先进制造》

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