
Chemosensors：基于MOF (CuBDC) - 微悬臂梁的红外光谱法实现高灵敏度、高选择性的甲烷检测

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42496.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！

Chemosensors：基于MOF (CuBDC) - 微悬臂梁的红外光谱法实现高灵敏度、高选择性的甲烷检测。 论文标题：MOF(CuBDC)-Microcantilever IR Spectroscopy for Methane Sensing with High Sensitivity and Selectivity

论文链接：<https://www.mdpi.com/2227-9040/13/1/8>

期刊名：Chemosensors

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/chemosensors>

文章导读

甲烷的全球增温潜势是二氧化碳的21倍，当前全球甲烷排放管控标准不断收紧，由此推动了对高性能甲烷传感器的需求。本篇是全南国立大学Yangkyu Park 团队撰写并在Chemosensors 期刊发表的文章，提出一种基于CuBDC 集成微悬臂的新型红外光谱技术 (CuBDC - 微悬臂红外光谱)，用于高灵敏度、高选择性的CH₄ 检测。采用滴干法结合强脉冲光技术在微悬臂上合成金属有机框架CuBDC。扫描电镜、X射线衍射和傅里叶变换红外光谱表征证实了CuBDC 的成功制备。该传感器在CH₄ 特征峰处的差分振幅比传统硅微悬臂提高约13倍，检测限低至14.05 ppm，且能清晰区分CH₄ 特征峰与水汽和丙酮蒸气的峰，表现出高选择性。该传感器在工业及环境甲烷检测中具有广阔应用前景。

研究过程与结果

本研究首次将红外光谱技术与MOF (金属有机框架) 集成的微悬臂相结合，开发出一种用于甲烷检测的新型传感器。针对传统微悬臂表面平坦、吸附能力有限的问题，采用强脉冲光技术在微悬臂上原位合成了高孔隙率的CuBDC (铜-对苯二甲酸MOF)，从而大幅增强了对甲烷的捕获能力。与以往仅依赖共振频移的低选择性方法不同，该传感器通过红外光谱获取分子的特征振动谱，实现了高选择性识别。

1. 材料与方法

材料：以0.1%甲烷(氮气平衡)

为目标气体，使用硅基微悬臂阵列，并采购了氢氧化钠、对苯二甲酸、过硫酸铵、DMF及多种醇类溶剂用于CuBDC合成。

CuBDC合成：微悬臂经清洗后溅射Cr/Cu层，通过化学氧化法在表面生成Cu(OH)₂

纳米线，再滴加BDC前驱液，利用强脉冲光(IPL)

快速加热使其转化为多孔CuBDC，底部溅射Cr/Au作为反射层，最后真空干燥去除残留溶剂。

表征方法：采用XRD分析晶体结构，SEM观察表面形貌，FTIR记录红外光谱。

甲烷测试：室温常压下进行，使用质量流量控制器调节甲烷和氮气的比例，先通氮气清洗1小时，再通入不同浓度甲烷评估灵敏度，同时通过鼓泡器引入水或丙酮蒸气测试选择性。

2. 结果与讨论

2.1. CuBDC微悬臂的原位制备与表征

本研究采用强脉冲光(IPL)技术在硅微悬臂上直接合成铜基MOF

(CuBDC)。首先在微悬臂上溅射薄铜层，然后用氧化溶液处理，使铜氧化并形成Cu(OH)₂

纳米线(图1)。该步骤显著增大了表面积，为MOF合成提供了更多活性位点。为避免高能量(>10 J)损坏低刚度微悬臂，采用最低能量(3 J)多次重复照射。经过160次IPL

脉冲后，形成了发育良好的CuBDC晶体(图2)，整个合成过程在3分钟内完成。XRD分析(图3)显示：氧化后在 $2\theta = 17.04^\circ$ 处出现Cu(OH)₂的(202)晶面特征峰；IPL处理后，在 $2\theta = 7.7^\circ$ 和 17.68° 处出现CuBDC的(001)和(002)晶面特征峰，表明形成了有序的晶体结构。

FTIR光谱(图4)进一步验证了CuBDC的存在： 734 cm^{-1} 和 1025 cm^{-1} 处的峰对应芳香环的C-H振动； 1396 cm^{-1} 和 1569 cm^{-1} 对应羧基基团的对称和不对称伸缩振动； $550 - 600\text{ cm}^{-1}$ 范围内的峰证实了Cu-O键的形成。SEM、XRD和FTIR分析共同证实了CuBDC在微悬臂上的成功合成。

图1. 展示铜 (Cu) 随时间转化为氢氧化铜 ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) 过程的扫描电子显微镜 (SEM) 图像：(a) 10分钟；(b) 20分钟；(c) 30分钟。

图2. 显示 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 向CuBDC 转化过程的扫描电子显微镜 (SEM) 图像，图中展示了该过程随闪光次数的变化：(a) 0次；(b) 90次；(c) 120次；以及 (d) 160次。经过160次闪光后，形成了CuBDC 晶体。

图3. 制备的CuBDC、 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 和Cu 的XRD 图谱对比

图4. 制备的CuBDC 的傅里叶变换红外光谱分析

2.2. CuBDC - 微悬臂红外光谱用于甲烷检测

通过差减法获得差分红外光谱 (减去纯N₂ 下的参考响应)。图5比较了在240 ppm CH₄ 和85 ppm 水蒸气条件下, CuBDC 微悬臂与传统双金属Si 微悬臂的红外光谱: Si 微悬臂未观察到明显峰, CuBDC 微悬臂在1300 cm⁻¹ (C – H 弯曲振动) 和1600 cm⁻¹ (O – H 剪刀振动) 处出现明显峰, CuBDC 微悬臂在1300 cm⁻¹处的差分振幅为42.85 mV, 而Si 微悬臂仅为3.37 mV, 灵敏度提高了约13倍。图6显示了5个浓度水平下的特征峰幅度 (各测量3次, 取平均值, 误差条为标准差)。根据信噪比 (SNR) = 3 时的线性拟合交点计算, 检测限 (LOD) 低至14.05 ppm, 接近无需加热器的CH₄传感器的最佳水平 (约10 ppm)。

图5. 在CH₄ 浓度为240 ppm 时, CuBDC 与硅微悬臂梁的红外响应对比

图6. CuBDC 微悬臂红外光谱中峰值振幅随CH₄浓度的变化，误差条表示基于三次测量结果计算出的标准偏差

2.3 优势与局限

与其他传感器相比，本传感器不依赖传感材料本身，而是通过分子振动识别实现高选择性，克服了金属氧化物需高温工作、碳基及MOF 传感器选择性不足的局限。与先前将CuBDC 制备在QCM 上的工作相比，本传感器的最低检测浓度显著提高，并能区分混合物中的不同成分。未来可通过引入Pt 修饰、ZnO 纳米棒等结构或采用压阻式读取方式进一步提升性能与实用性。目前的局限性在于需在乙烯、丁烯、氢气等更复杂多组分气体中验证选择性，且红外光谱产生的多维数据潜力未充分利用，后续可结合人工智能技术实现对复杂混合气体中各组分的精确识别与浓度定量。

研究总结

本研究提出了一种基于CuBDC 微悬臂的红外光谱方法用于甲烷检测，采用滴干法结合强脉冲光技术在精密的微悬臂上合成了CuBDC MOF。通过SEM 观察了CuBDC 的晶体形貌，XRD 确认了其有序的晶体结构，FTIR 鉴定出相应的官能团，这些表征共同验证了CuBDC 在微悬臂上的成功合成。CuBDC - 微悬臂红外光谱对不同浓度的甲烷表现出清晰的响应，并能有效区分甲烷峰与水汽和丙酮蒸气峰。与传统的硅微悬臂相比，CuBDC 微悬臂在甲烷检测中表现出显著更高的灵敏度和选择性，凸显了其在气体检测应用中的潜力，是一个具有广阔应用前景的甲烷传感平台。

Seo, S.; Kwon, S.B.; Park, Y. MOF(CuBDC)-Microcantilever IR Spectroscopy for Methane Sensing with High Sensitivity and Selectivity. *Chemosensors* 2025, 13, 8.

Chemosensors期刊介绍

主编：Nicole Jaffrezic-Renault, CNRS/University of Franche-Comté, France; Jin-Ming Lin, Tsinghua University, China

期刊范围涵盖化学传感理论；机理和检测原理；开发、制造技术；化学分析方法在食品、环境监测、医药、制药、工业、农业等方面的应用。

2025 Impact Factor：4.4

2025 CiteScore：8.1

Time to First Decision：19.8 Days

Acceptance to Publication：3.7 Days

来源：Chemosensors

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

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发