

# 振动强耦合对葡萄糖氧化酶在电化学催化反应中的调控研究

孙庆庆<sup>1\*</sup>, 路薇薇<sup>2\*</sup>, 刘宸宇<sup>1</sup>, 郭俊<sup>3</sup>, 张峰<sup>1,3</sup>, 彭润玲<sup>1</sup>, 赵欣敏<sup>1#</sup>, 王莉萍<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海交通大学医学院附属新华医院, 上海

<sup>3</sup>中国科学院大学温州研究所, 浙江 温州

收稿日期: 2025年9月14日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年12月16日

## 摘要

振动强耦合(Vibrational Strong Coupling, VSC)通过光 - 物质相互作用可以改变分子能级和反应势垒, 以此调控多种生化反应。电化学对电极表面的电子转移过程具有较高的灵敏度, 但将VSC与电化学结合以调控生物催化反应的相关研究仍然有限。本研究以葡萄糖氧化酶(Glucose Oxidase, GOD)在法布里珀罗(FP)腔内催化葡萄糖的氧化反应为模型, 构建了电化学-FP腔体系, 系统研究了FP腔与水的O-H伸缩振动( $3409\text{ cm}^{-1}$ )耦合对该反应的影响。结果表明, 通过调谐FP腔与水分子的耦合强度, GOD的催化率最高被抑制至原来的37% (抑制率达63%), 且在不同耦合强度下, GOD的催化率与水的O-H伸缩振动带密切相关。这项工作不仅揭示了VSC对生物电化学反应的调控作用, 也表明电化学可用于实时监测FP腔内的反应过程, 为VSC在生物电化学体系中的应用提供了新的实验证据。

## 关键词

法布里 - 珀罗腔, 振动强耦合, 电化学, 葡萄糖氧化酶

# Research on the Regulation of Glucose Oxidase in Electrochemical Catalysis under Vibrational Strong Coupling

Qingqing Sun<sup>1\*</sup>, Weiwei Lu<sup>2\*</sup>, Chenyu liu<sup>1</sup>, Jun Guo<sup>3</sup>, Feng Zhang<sup>1,3</sup>, Runling Peng<sup>1</sup>, Xinmin Zhao<sup>1#</sup>, Liping Wang<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

\*共同第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 孙庆庆, 路薇薇, 刘宸宇, 郭俊, 张峰, 彭润玲, 赵欣敏, 王莉萍. 振动强耦合对葡萄糖氧化酶在电化学催化反应中的调控研究[J]. 生物过程, 2025, 15(4): 316-324. DOI: [10.12677/bp.2025.154040](https://doi.org/10.12677/bp.2025.154040)

<sup>2</sup>Xinhua Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai

<sup>3</sup>Wenzhou Institute, University of Chinese Academy of Sciences, Wenzhou Zhejiang

Received: September 14, 2025; accepted: September 22, 2025; published: December 16, 2025

## Abstract

Vibrational Strong Coupling (VSC) can modulate molecular energy levels and reaction barriers through light-matter interactions, thereby regulating biochemical reactions. Although electrochemistry is highly sensitive to electron transfer at electrode interfaces, studies combining VSC with electrochemistry to control biocatalytic reactions remain limited. Here, glucose oxidation catalyzed by Glucose Oxidase (GOD) within a Fabry-Pérot (FP) cavity was used as a model system, and an electrochemical FP-cavity platform was established to investigate the effect of coupling between the FP cavity and the O-H stretching vibration of water ( $3409\text{ cm}^{-1}$ ). By tuning the coupling strength, GOD catalytic activity was suppressed to as low as 37% of its original rate (maximum inhibition of 63%), and the catalytic rate showed a clear correlation with the water O-H stretching band under different coupling conditions. These findings reveal the regulatory effect of VSC on bioelectrochemical reactions and demonstrate that electrochemistry can be used for real-time monitoring of reactions within the FP cavity, providing new experimental evidence for the application of VSC in bioelectrochemical systems.

## Keywords

Fabry-Pérot Cavity, VSC, Electrochemistry, Glucose Oxidase

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

振动强耦合(Vibrational Strong Coupling, VSC)是一种基于量子电动力学的物理调控手段。通过将分子振动模式与光学微腔(如法布里 - 珀罗腔)中的光子模式进行强耦合, 可形成混合光 - 物质态(极化激元), 在光谱上表现为出现两个极化子吸收峰, 分别为 P+ 和 P- [1]。这种能级重构不仅会改变分子基态与激发态的能量分布, 还可能影响反应过渡态的能垒, 从而调控化学反应的速率与选择性。近年来, VSC 已被广泛应用于酶催化、ATP 水解、DNA 自组装及其他生物化学过程中[2]-[4], 展现出在调控反应动力学、选择性以及能量传递效率方面的巨大潜力。

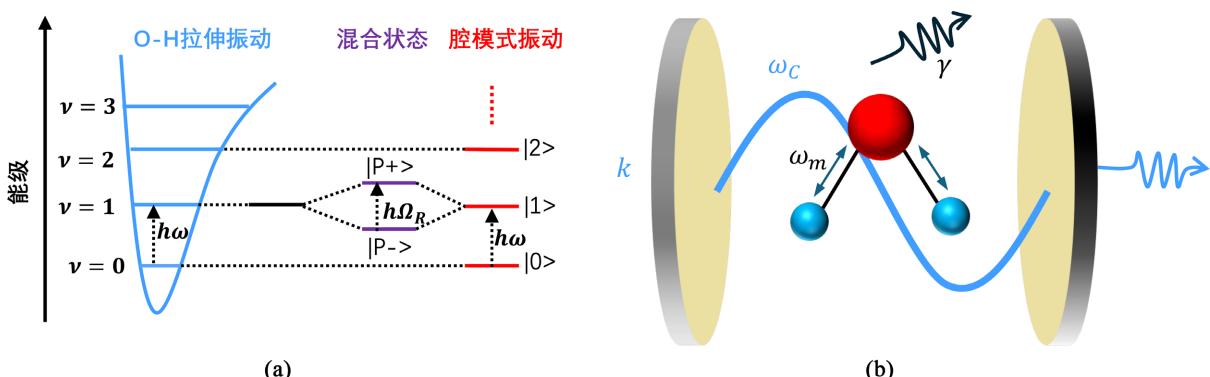
电化学作为研究电子转移过程的重要工具, 通过在外加电场作用下诱导氧化还原反应, 可实时监测反应过程中的电子传递行为, 具有高灵敏度、高时间和空间分辨率及良好的可控性[5]。在电化学界面中, 电子转移不仅是许多生物能量过程(如呼吸链和 ATP 合成)的核心, 也在生物传感、抗氧化活性检测及催化反应中扮演关键角色[6]-[8]。将电化学系统与光学微腔结合, 构建电化学 - 光学耦合平台, 为实现对生物氧化还原反应的实时监测和调控提供了新的可能, 但目前此类研究报道仍相对有限。

在本研究中, 我们探讨了 GOD 在 FP 腔内催化葡萄糖的氧化还原过程。并利用电化学手段原位检测 VSC 强度对腔内反应的调控效应。结果表明, 在共振耦合条件下, 加入 GOD 后的电流增量( $\Delta I$ )随 VSC 耦合强度变化明显, 与非共振条件相比, GOD 的催化效率最大被抑制达 63%。这项工作不仅为揭示 VSC

调控电化学反应的微观机制提供了直接实验证据，也为开发新型光控电化学传感器、高效能量转换装置及光调控生物催化系统奠定了理论基础，同时为未来跨学科应用提供了重要参考。

## 2. 实验材料与方法

当分子的振动或电子跃迁频率与光学微腔的光子模式频率发生共振时，会出现光-物质杂化并形成强耦合现象，从而产生两种兼具光与物质特性的极化态——上极化激元( $P+$ )和下极化激元( $P-$ )（图 1(a)）。这两个态因真空拉比分裂而在能量上分开，其本质来源于分子振动或电子跃迁与腔光子模式之间的量子杂化。在法布里-珀罗(FP)微腔中，当分子的振动跃迁频率( $\omega_m$ )与腔模频率( $\omega_c$ )共振时(图 1(b))，如果光子在镜面间的反射过程中被分子多次吸收，其交换速率远大于材料( $\gamma$ )与腔体( $k$ )的损耗率，就会形成稳定的光-物质强耦合态[9][10]。



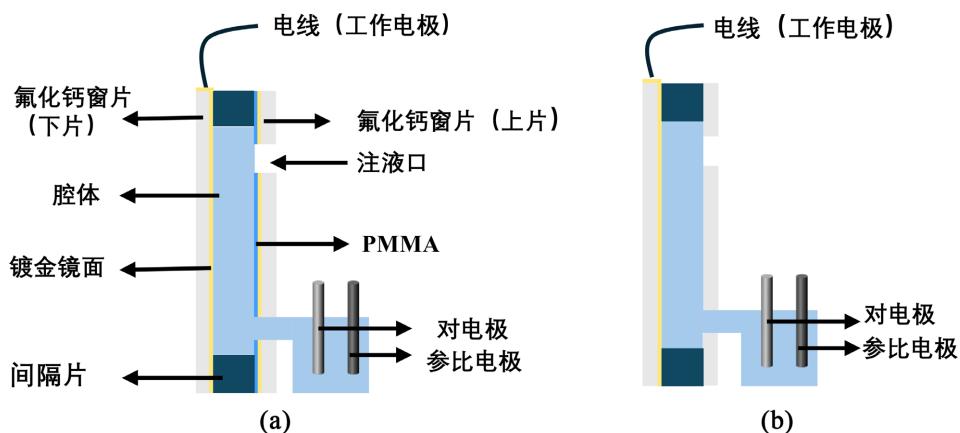
**Figure 1.** Schematic diagram generated by VSC. (a) Coupling of the O-H stretching vibration of water with the cavity mode; (b) Schematic diagram of the resonance coupling of O-H vibration with frequency  $\omega_m$  and cavity mode with frequency  $\omega_c$  in the FP cavity

**图 1.** VSC 产生的示意图。(a) 水的 O-H 伸缩振动与腔模的耦合；(b) 在 FP 腔中，频率为  $\omega_m$  的 O-H 振动与频率为  $\omega_c$  的腔模共振耦合示意图

法布里-珀罗(FP)腔的核心结构由两块平行的氟化钙(CaF<sub>2</sub>)窗口片(秦皇岛固晶科技有限公司，中国)及微米级聚酯薄膜间隔片(LGC Ltd)组成[11]。上窗口片设计有两个小孔，分别作为液体注入口和出口。其制备流程如下：

首先，使用离子溅射仪(SBC-12，北京科宇真空技术有限公司)在两个窗口片的任意一面镀覆金膜，以形成高反射镜面。随后，在下窗口片的侧面镀上一条约 1 cm 长的金层，用于与正面金膜导通，并通过万用表测试导通情况(蜂鸣声表示导通成功)。若为酶体系，还需使用旋涂仪(KW-4T，北京赛奥特科技有限公司)在下窗口片上滴加 20 μL、浓度为 6 mg/mL 的 GOD 溶液。对于上窗口片，无论是否含酶体系，都需在其镀金表面旋涂一层聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA，上海金穗生物科技有限公司)，以防止金膜在后续实验中脱落并造成干扰。之后，将处理后的两片窗口片以镀金面相对的方式对齐，中间夹入厚度为 3.6 μm 的 Mylar 间隔片，并用胶带将电线连接至下窗口片侧面镀金部分，从而组装成作为工作电极的电化学-FP 微腔。上下窗片与间隔片所夹持的空间即为化学反应进行的微腔室(FP 腔及组件见附录图 S1、S2)。

图 2 所示为电化学-FP 微腔的工作原理：图 2(a)为上下窗片均镀金的共振耦合条件，图 2(b)为仅下片镀金的非共振耦合条件。反应液通过注射器从注液口注入微腔室，并从出液孔流出至外部大溶液体系，与对电极和参比电极形成三电极系统。为防止反应液渗出至顶部镀金电线造成误差，两个 CaF<sub>2</sub> 窗片之间的缝隙需用 PDMS 涂抹密封。实验结束后，电化学-FP 腔必须拆卸清洗，并重新镀金组装，不能重复使用。



**Figure 2.** Working principle diagram of the FP cavity. (a) Electrochemical FP structure under resonant coupling conditions; (b) Electrochemical FP structure under non-resonant coupling

**图 2.** FP 腔的工作原理图。 (a) 共振耦合条件下的电化学 FP 结构; (b) 非共振耦合下的电化学 FP 结构

电化学-FP 腔组装完成后，首先将其置于傅里叶变换红外光谱仪中(扫描范围：7000~500 cm<sup>-1</sup>，分辨率：2 cm<sup>-1</sup>)进行透射光谱测量。通过旋紧或松开四个螺丝调整腔距，观察透射光谱是否呈现高而窄、且规律分布的峰，此时 FP 腔即达到较高的品质因子(Q-factor)。腔距 L 可通过以下两个基本公式进行计算：

$$\nu_m = \frac{10^4 m}{2nL} \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{10^4 m}{2n * FSR} \quad (2)$$

其中 L、m、n、ν 分别表示腔的物理长度(μm)、腔模阶数(1, 2, 3...)、腔内介质折射率以及第 m 阶腔模对应的波数(cm<sup>-1</sup>)。自由光谱范围(FSR)定义为相邻腔模峰之间的波数间隔，当 m = 1 时，由公式(1)计算得到的特定腔长 L<sub>1</sub> 是实现 VSC 的最佳条件。

实验所用试剂及来源如下：葡萄糖氧化酶(GOD，100 单位/mg，来源：黑曲霉)购自上海麦金林生化有限公司；D-(+)-葡萄糖、铁氰化钾(K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>)及氯化钾(KCl)购自上海泰坦科技股份有限公司；PBS (1X，预混颗粒，pH = 7.4)购自亚玛迪斯生命科学公司。

实验开始前，首先配制 pH 值为 7.4 的磷酸盐缓冲液(PBS)，该溶液含有 1 mM 的葡萄糖(C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>)、2 mM 的 K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> 和 0.1 M 的 KCl。随后，使用注射器将葡萄糖溶液从注液口注入已调制的 FP 腔微腔室内，直至溶液从出口流出并进入外部大溶液系统。

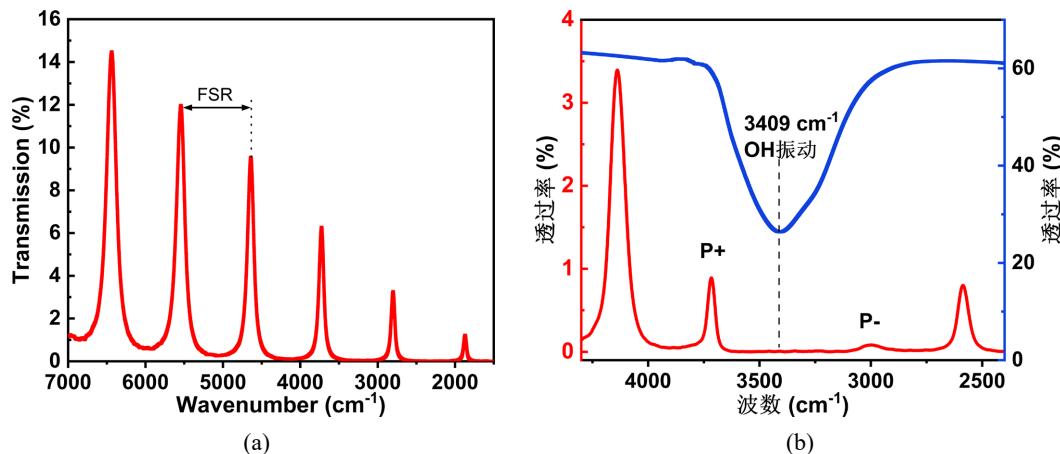
电化学测试使用 CHI6650E 电化学工作站(上海辰华仪器有限公司)进行。以 GOD 修饰的窗口片作为工作电极，铂(Pt)电极作为对电极，银/氯化银(Ag/AgCl)电极作为参比电极，采用计时电流法(IT)原位检测腔内 VSC 对 GOD 催化作用的影响。IT 测试电压设定为 0.7 V，测量时间为 300 s，记录稳定电流值。随后在相同腔距下，分别计算共振条件与非共振条件下加入酶后的电流增量(ΔI)。

需要说明的是，非共振条件仅通过腔距变化实现，用于对比和评估共振条件对 GOD 催化活性的影响。每个腔距的实验均重复三次，并在 25℃恒温水浴中完成，以降低实验误差。

### 3. 实验结果与分析

本实验选择了水的 O-H 伸缩振动跃迁与 5 阶(m = 5)腔模式耦合，以实现共振强耦合策略，并重点研究了 3409 cm<sup>-1</sup> 处的 O-H 振动(红外透射光谱见附录图 S3)。根据公式(1)和(2)可知，为最大程度增强水分

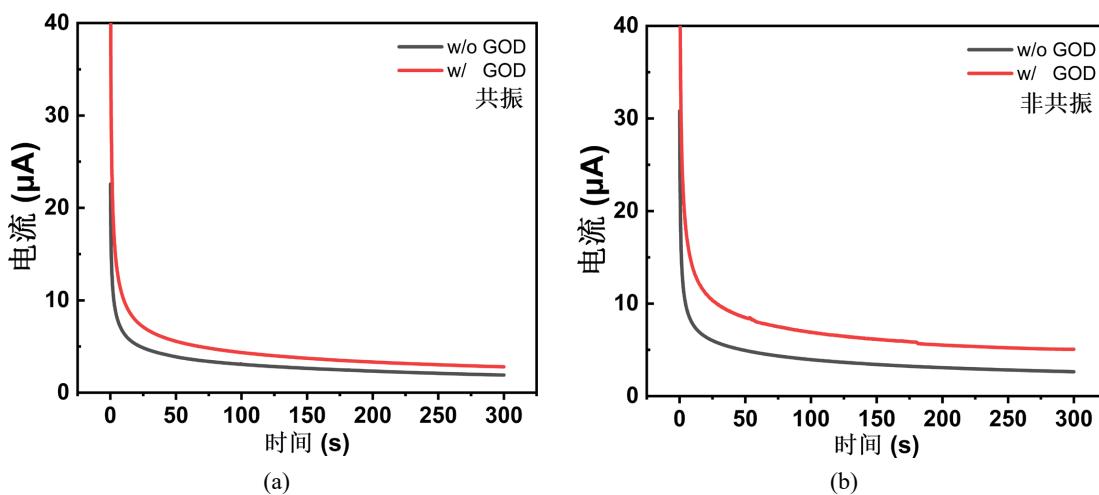
子与光腔的耦合强度, FSR 应调控至  $909\text{ cm}^{-1}$ , 对应的腔距约为  $5.5\text{ }\mu\text{m}$ , 即振动强耦合点。在该腔距下, 空腔的红外透射光谱如图 3(a)所示, 表现出较高的品质因子。当注入反应液后, 水分子与腔模式发生耦合, 光谱出现两个极化子态( $\text{P}^+$ 和 $\text{P}^-$ ), 其真空拉比分裂值达到  $720\text{ cm}^{-1}$ (图 3(b)), 超过了 O-H 振动模式的线宽( $439\text{ cm}^{-1}$ , 半高宽), 表明基于 O-H 拉伸振动的 VSC 已成功建立[12]。



**Figure 3.** Rabi splitting under VSC. (a) IR transmission spectrum of the cavity at a cavity distance of  $5.5\text{ }\mu\text{m}$ ; (b) IR transmission spectrum of Rabi splitting produced by injecting water into the FP cavity

**图 3.** VSC 下的拉比分裂。(a) 腔距为  $5.5\text{ }\mu\text{m}$  时空腔的红外透射光谱; (b) 向 FP 腔注入水后产生拉比分裂的红外透射光谱

以下测量结果均比较了共振与非共振条件下  $300\text{ s}$  时的电流。图 4(a)和图 4(b)分别展示了腔距为  $5.5\text{ }\mu\text{m}$  时, 在共振条件和非共振条件下加入 GOD 前后的 IT 曲线。需要说明的是, 图 4 中的 IT 曲线均基于三次实验结果处理后重新绘制, 以减少实验误差。



**Figure 4.** Comparison of IT curves before and after adding GOD. (a) IT curves under resonant coupling condition with cavity spacing of  $5.5\text{ }\mu\text{m}$ ; (b) IT curves under non-resonant coupling condition with cavity spacing of  $5.5\text{ }\mu\text{m}$

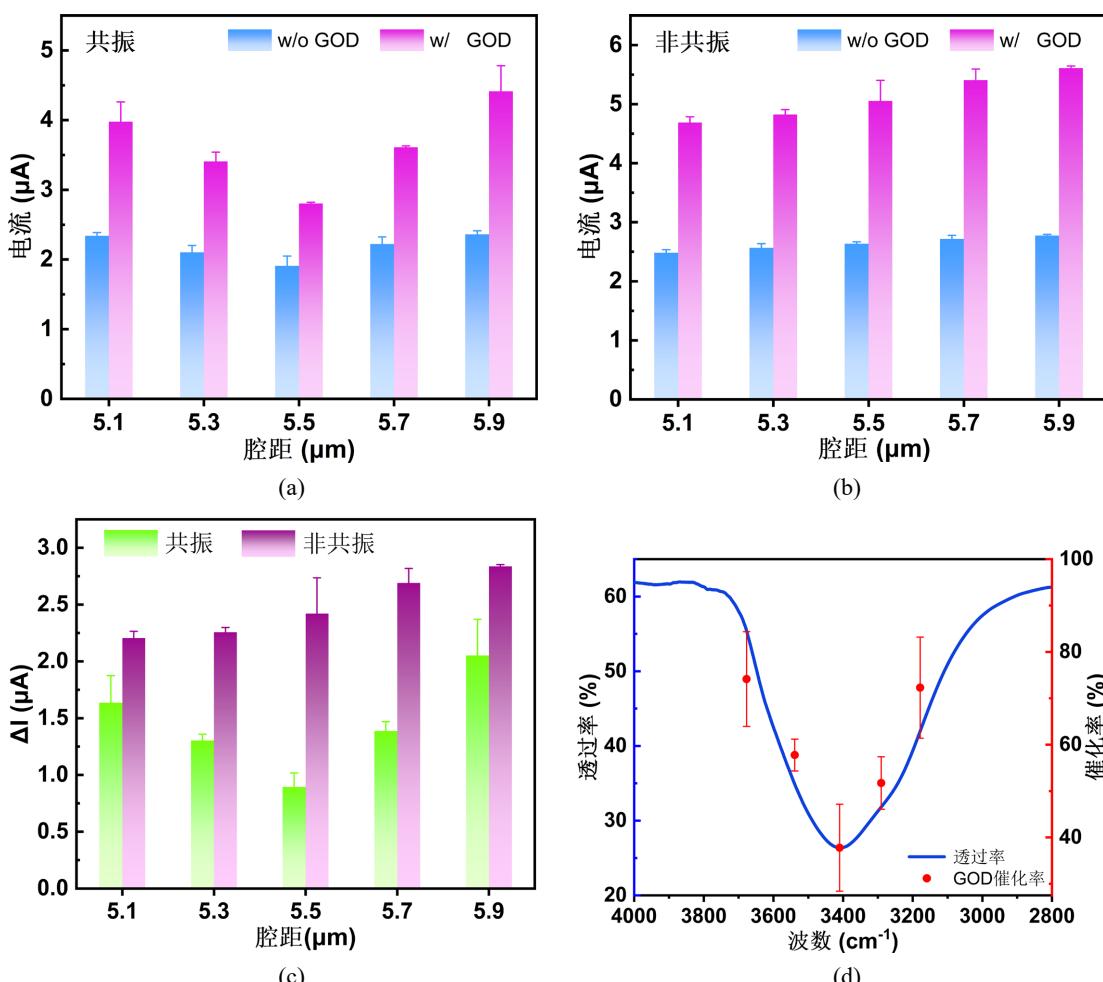
**图 4.** 加入 GOD 前后的 IT 曲线对比。(a) 共振耦合条件下, 腔距为  $5.5\text{ }\mu\text{m}$  的 IT 曲线; (b) 非共振耦合条件下, 腔距为  $5.5\text{ }\mu\text{m}$  时的 IT 曲线

由于  $5.5\text{ }\mu\text{m}$  ( $3409\text{ cm}^{-1}$ ) 为共振强耦合点, 接着我们选用了  $5.3\text{ }\mu\text{m}$  ( $3538\text{ cm}^{-1}$ )、 $5.1\text{ }\mu\text{m}$  ( $3677\text{ cm}^{-1}$ )、 $5.7\text{ }\mu\text{m}$  ( $3290\text{ cm}^{-1}$ ) 和  $5.9\text{ }\mu\text{m}$  ( $3178\text{ cm}^{-1}$ ) 作为弱耦合与之进行比较; 图 5(a)显示了共振条件下由 IT 曲线绘

制的柱状图, 图 5(b)则对应非共振条件。对 GOD 的催化效果, 我们把加酶后电流增量记为  $\Delta I$ , 并在共振和非共振状态下分别进行监测; 结果表明, 当腔距在 5.1~5.9  $\mu\text{m}$  之间变化时, 共振条件下的  $\Delta I$  随耦合强度而变化, 而非共振条件下的  $\Delta I$  则随光程长度呈线性变化(图 5(c))。其中, 在 3409  $\text{cm}^{-1}$  腔模下, 共振与非共振的  $\Delta I$  差异最大, 说明此时抑制作用最显著。这些结果与振动模式通过与光子腔耦合改变势能格局的机理相一致。

通过调节水分子与 FP 腔模式之间的共振耦合强度, 可以有效调控 GOD 的催化率。GOD 的催化率通过共振与非共振条件下  $\Delta I$  的比值来计算。结果显示, 当腔模式在 3100~3700  $\text{cm}^{-1}$  范围内变化时, 3409  $\text{cm}^{-1}$  条件下的催化率最低, 仅为 37%, 即 VSC 对葡萄糖氧化反应的抑制率达到 63%, 此处 VSC 效果最强。当腔模波数偏高(3538  $\text{cm}^{-1}$ : 58%; 3677  $\text{cm}^{-1}$ : 74%)或偏低(3290  $\text{cm}^{-1}$ : 51%; 3178  $\text{cm}^{-1}$ : 72%)时, GOD 的催化率逐渐升高, 表明 VSC 的抑制作用减弱。这一趋势与远离水的 O-H 振动带后腔 - 分子耦合减弱的现象相一致(图 5(d))。

GOD 的催化活性中心为黄素腺嘌呤二核苷酸(FAD), 其催化循环包含两个关键步骤: 第一氧化阶段,



**Figure 5.** Modulation of GOD catalytic activity by VSC. (a) IT results at 5.1~5.9  $\mu\text{m}$  lumen spacing under resonant coupling. (b) IT results at 5.1~5.9  $\mu\text{m}$  lumen spacing under non-resonant coupling. (c)  $\Delta I$  values after adding GOD at different cavity pitches. (d) Catalytic rate of GOD at different cavity mode wave numbers

**图 5.** VSC 对 GOD 催化活性的调控。(a) 共振耦合下 5.1~5.9  $\mu\text{m}$  腔距的 IT 结果。(b) 非共振耦合下 5.1~5.9  $\mu\text{m}$  腔距的 IT 结果。(c) 不同腔距下加入 GOD 后的  $\Delta I$  值。(d) 不同腔模波数下 GOD 的催化率

GOD 的氧化形式(GOD<sub>o</sub>, 含 FAD)从葡萄糖分子获取两个电子和两个质子, 被还原为 GOD<sub>r</sub>(含 FADH<sub>2</sub>), 同时葡萄糖被氧化; 第二再氧化阶段, GOD<sub>r</sub> 需将电子转移至最终受体氧气(O<sub>2</sub>), 使其还原为过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 自身重新转化为 GOD<sub>o</sub>, 从而维持催化循环[13]。值得注意的是, 电子从 FADH<sub>2</sub> 至 O<sub>2</sub> 的传递并非直接进行, 水分子在其中扮演“电子桥”角色, 即 FADH<sub>2</sub> 先将电子和质子转移至水分子, 生成高活性水自由基物种(如·OH 或 H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), H 该活性物种进一步将电子传递至 O<sub>2</sub>。

VSC 通过 FP 光学微腔与水分子的 O-H 伸缩振动(3409 cm<sup>-1</sup>)发生强耦合, 引发拉比分裂, 形成高能态(P+)和低能态(P-)两个极化激元态。已有实验证据表明, 这种耦合会显著影响酶的催化活性, 例如 Ebbesen 等人发现 O-H 振动与腔模强耦合能够降低胃蛋白酶(pepsin)的活性[14]。同时, 综述性研究指出, P+态能量较高且通过非辐射途径快速衰减, 而 P-态能量较低、更为稳定, 因此更可能在化学反应动力学中发挥主导作用[15]。这些结果共同表明, VSC 所导致的能级重构与极化子态形成, 可能是调控酶催化效率的关键机制。其中, P-态的能量低于原始 O-H 振动能级, 导致 O-H 键振动频率下降。这种频率降低意味着水分子间的氢键网络更加稳定, 同时水分子的电负性增强, 即对电子的吸引和保持能力提高。

在 GOD 催化反应中, 水分子通常需要作为电子给体参与电子转移。然而, 在 VSC 条件下, 由于水分子稳定性增加和电负性增强, 其电子供体能力下降, 从而阻碍了催化循环中的两个关键步骤: 首先, FADH<sub>2</sub> 难以将电子转移至水分子; 其次, 活化的水物种也难以将电子进一步传递给 O<sub>2</sub>。结果是, 整个电子传递链被有效“堵塞”, O<sub>2</sub> 无法顺利再生为 GOD<sub>o</sub>, 导致催化循环显著受抑。电化学实验结果进一步验证了这一机制, 显示电子转移能垒升高, 整体催化速率明显下降。除了水分子的 O-H 振动模式外, 体系中还可能存在其他潜在的耦合对象。例如, 葡萄糖氧化酶的酰胺 I、II 振动带以及底物葡萄糖分子的 O-H 振动, 也可能与腔模发生相互作用, 从而对电子-质子转移过程产生影响。尽管本研究的结果主要表明水 O-H 振动在调控作用中占主导地位, 但未来仍需通过选择性同位素标记、不同底物对比实验或理论模拟, 进一步明确各类振动模式在反应动力学调控中的具体贡献。这将有助于全面理解 VSC 对复杂生物体系的调控机制。

## 4. 结论

总之, 本研究证明了含 O-H 伸缩振动的 VSC 能显著调控 GOD 的催化率, 并可通过电化学信号实现实时监测。在 FP 腔内的 GOD 催化体系中, 我们观测到最高 63% 的抑制率, 说明 VSC 对水分子的 O-H 振动的调控是影响电子转移效率的关键因素。具体而言, 强耦合引发极化子态的形成, 改变了水分子氢键网络的稳定性, 从而阻碍了底物与酶活性位点之间的质子耦合电子转移过程, 使电子转移速率下降。本研究不仅为理解生物电化学反应提供了新的微观视角, 也为未来利用光学手段调控酶活性及构建光控生物传感器体系提供了新的可能性。

## 致 谢

感谢国家自然科学基金项目(No. 32271298, T2241002)、国家重点研发计划项目(No. 2021YFA1200402)、太赫兹生物物理创新实验室项目(No. 23-163-00-GZ-001-001-02-01)、中国科学院大学温州研究所项目(WIUCASQD2021003, WIUCASQD2021011)的支持。

## 参 考 文 献

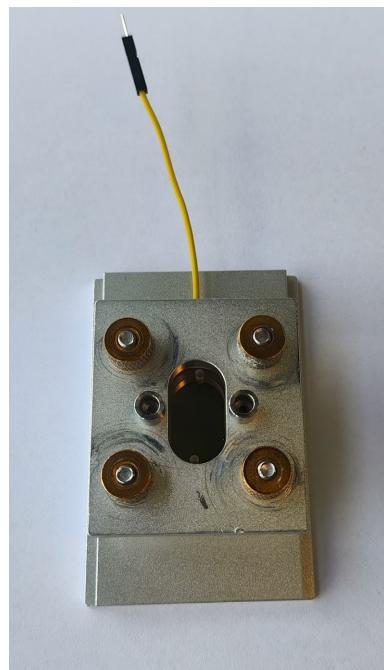
- [1] Hirai, K., Hutchison, J.A. and Uji-I, H. (2023) Molecular Chemistry in Cavity Strong Coupling. *Chemical Reviews*, **123**, 8099-8126. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00748>
- [2] Gu, K., Si, Q., Li, N., Gao, F., Wang, L. and Zhang, F. (2023) Regulation of Recombinase Polymerase Amplification by Vibrational Strong Coupling of Water. *ACS Photonics*, **10**, 1633-1637. <https://doi.org/10.1021/acspophotonics.3c00243>

- [3] Si, Q., Guo, J., Lian, J., Liu, A., Zhao, X., Liu, S., *et al.* (2024) Multimodal Competition Shapes Enzymatic ATP Hydrolysis: Deciphering Microscale Confinement by Vibrational Strong Coupling. *Chemical Engineering Journal*, **496**, Article 154197. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154197>
- [4] Zhong, C., Hou, S., Zhao, X., Bai, J., Wang, Z., Gao, F., *et al.* (2023) Driving DNA Origami Coassembling by Vibrational Strong Coupling in the Dark. *ACS Photonics*, **10**, 1618-1623. <https://doi.org/10.1021/acspophotonics.3c00235>
- [5] 刘润野. 基于三电极的电化学检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- [6] Magar, H.S., Hassan, R.Y.A. and Mulchandani, A. (2021) Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications. *Sensors*, **21**, Article 6578. <https://doi.org/10.3390/s21196578>
- [7] Hoyos-Arbeláez, J., Vázquez, M. and Contreras-Calderón, J. (2017) Electrochemical Methods as a Tool for Determining the Antioxidant Capacity of Food and Beverages: A Review. *Food Chemistry*, **221**, 1371-1381. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.017>
- [8] 李文德. 靶向吸附-电化学催化还原去除地下水硝酸盐效果及机制研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [9] 白家琪. 振动强耦合对蔗糖水解动力学的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州医科大学, 2023.
- [10] 常蕴玮. 表面等离激元结构与红外分子的共振耦合及其优化与应用[D]: [博士学位论文]. 广州: 广州医科大学, 2022.
- [11] Hirai, K., Takeda, R., Hutchison, J.A. and Uji-I, H. (2020) Modulation of Prins Cyclization by Vibrational Strong Coupling. *Angewandte Chemie International Edition*, **59**, 5332-5335. <https://doi.org/10.1002/anie.201915632>
- [12] George, J., Chervy, T., Shalabney, A., Devaux, E., Hiura, H., Genet, C., *et al.* (2016) Multiple Rabi Splittings under Ultrastrong Vibrational Coupling. *Physical Review Letters*, **117**, Article 153601. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.117.153601>
- [13] 张震. 葡萄糖氧化酶的理化性质、作用机制及其在动物生产中的应用研究进展[J]. 饲料研究, 2025, 48(15): 163-169.
- [14] Garcia-Vidal, F.J., Ciuti, C. and Ebbesen, T.W. (2021) Manipulating Matter by Strong Coupling to Vacuum Fields. *Science*, **373**, Article 6551. <https://doi.org/10.1126/science.abd0336>
- [15] Vergauwe, R.M.A., Thomas, A., Nagarajan, K., Shalabney, A., George, J., Chervy, T., *et al.* (2019) Modification of Enzyme Activity by Vibrational Strong Coupling of Water. *Angewandte Chemie International Edition*, **58**, 15324-15328. <https://doi.org/10.1002/anie.201908876>

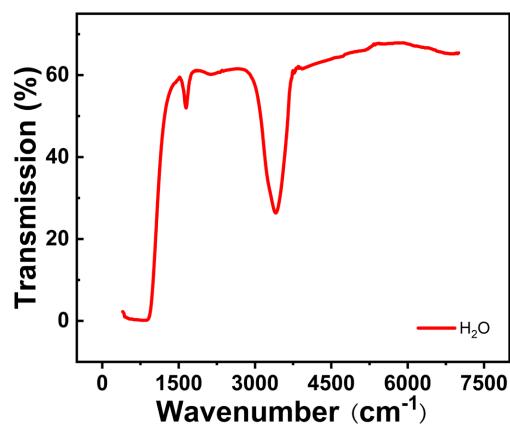
## 附 录



**Figure S1.** FP cavity component diagram  
**图 S1.** FP 腔组件图



**Figure S2.** Electrochemical-FP cavity diagram  
**图 S2.** 电化学-FP 腔图



**Figure S3.** Infrared transmission spectrum of pure water  
**图 S3.** 纯水的红外透射光谱