

激光诱导石墨烯直接电化学检测生命小分子研究进展

何嘉濠, 苏彦鸣, 顾婷婷*, 葛文宾, 周 杨, 周根宇, 于思佳

辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月12日

摘 要

激光诱导石墨烯(LIG)是通过激光照射碳前驱体材料表面快速形成的具有独特的三维多孔结构、良好的导电性、高比表面积以及良好机械柔韧性的一种新型的柔性电极材料。相较于传统电极, LIG在结构与性能上具有独特优势, 在无酶、高灵敏检测中展现出不可替代的优势, 为生命小分子的电化学检测搭建了全新的平台。本文重点总结归纳了LIG电极的主流制备方式和LIG电极直接电化学检测过氧化氢、葡萄糖、多巴胺等生命小分子的研究进展, 分析直接检测机制与性能优化策略, 并对当前挑战及未来发展方向进行展望。旨在进一步推动LIG电化学传感器向微型化、高通量、便携式方向发展, 为生命小分子的快速精准检测提供全新技术路径与产业化应用支撑。

关键词

激光诱导石墨烯, 电化学传感器, 小分子检测, 柔性电极

Research Progress on Direct Electrochemical Detection of Small Biomolecules Using Laser-Induced Graphene

Jiahao He, Yanming Su, Tingting Gu*, Wenbin Ge, Yang Zhou, Genyu Zhou, Sijia Yu

School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: April 9, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 12, 2026

*通讯作者。

文章引用: 何嘉濠, 苏彦鸣, 顾婷婷, 葛文宾, 周杨, 周根宇, 于思佳. 激光诱导石墨烯直接电化学检测生命小分子研究进展[J]. 分析化学进展, 2026, 16(2): 118-129. DOI: 10.12677/aac.2026.162014

Abstract

Laser-induced graphene (LIG) is a novel flexible electrode material rapidly prepared via laser irradiation on carbon precursors, characterized by a unique three-dimensional porous structure, outstanding electrical conductivity, large specific surface area, and favorable mechanical flexibility. Owing to its distinct structural and performance advantages over conventional electrodes, LIG shows irreplaceable merits in enzyme-free and highly sensitive detection, establishing a new platform for the electrochemical sensing of small biomolecules. This review focuses on summarizing the preparation of LIG electrodes and research progress in the direct electrochemical detection of vital small molecules such as hydrogen peroxide, glucose, and dopamine. The direct detection mechanisms and performance optimization strategies are analyzed, and current challenges together with future development directions are discussed. The aims to advance LIG electrochemical sensors toward miniaturization, high throughput and portability, offering a new technical route for rapid, accurate detection of small biomolecules.

Keywords

Laser-Induced Graphene, Electrochemical Sensor, Detection of Small Molecules, Flexible Electrode

Copyright © 2026 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

石墨烯是以 sp^2 杂化碳原子构成的六角蜂巢状二维纳米材料，具有优异比表面积和电化学活性位点密度，导电性能突出。其表面碳原子可直接与生物小分子作用，环境敏感性优于碳纳米管。同时，石墨烯出色的杨氏模量和弹性使其成为柔性电极的理想基材。然而，传统制备方法[1]-[3]存在高能耗、低产率等瓶颈，制约了规模化应用。2014年，TOUR团队[4]研发的激光诱导石墨烯(Laser-Induced Graphene, LIG)技术取得重大突破，该技术利用 CO_2 红外激光在聚酰亚胺(PI)薄膜表面通过激光直写工艺制备出 LIG。LIG 的制备过程不仅具有低成本、高精度、可控性强、图案可定制等特点，且无需特殊氛围或额外试剂，对环境几乎无污染，大幅缩短了石墨烯的合成周期。LIG 具有优秀的导电性和较大的比表面积，同时拥有孔隙率高、组成与结构可调、稳定性与柔韧性强等优势。此外，通过调整激光器种类、激光功率、扫描速度、扫描次数等参数[5]，可灵活调控 LIG 的质量与性能；通过合适的固定化方法，还能将纳米材料[6][7]或其他电子媒介体[8][9]修饰到 LIG 电极的工作区域表面，进而构建针对小分子的电化学传感器。

过氧化氢等生命小分子是人体代谢状态的直接反映，也是疾病诊断与治疗的重要依据；而在食品生产等环节，这类小分子的残留量更直接关系到食品安全。因此，建立一种快速、准确且经济的生命小分子检测方法，具有至关重要的意义。电化学传感器能够借助电极与电解质溶液界面的可控氧化还原或离子交换反应，将化学信息实时转化为电信号，从而提供直观、迅速的检测结果[10]。这种检测方式无需复杂的样品前处理步骤，可实现直接在线检测，大幅缩短检测时间，有效弥补了传统检测方法操作繁琐、耗时长的不足；同时，其结构简单、体积小、能耗较低，便于进行集成化与微型化设计，能够适配便携式检测设备与长期在线监测系统，为环境监测、即时诊断等场景提供了坚实的技术支撑，在药物活性成分检测[11][12]、环境要素及污染物检测[13][14]、病毒检测[15]等众多即时检测领域得到了广泛应用。

本文重点总结 LIG 电极制备和直接检测过氧化氢、葡萄糖、多巴胺等生命小分子的研究进展，深入分析其直接检测机制与性能优化策略，同时剖析当前 LIG 电化学传感器在实际应用中面临的核心挑战，并对该技术未来的发展方向进行展望，为 LIG 电化学传感器在相关领域的后续研究、技术优化与产业化应用提供参考。

2. 激光诱导石墨烯的制备与直接检测基础

2.1. LIG 的激光写入制备

激光写入法是 LIG 的主流制备技术，以光热转换为核心原理，通过激光对碳前驱体选择性刻蚀、石墨化，实现石墨烯的一步法制备。Barjinikhabbaz 等[16]通过比较 CO₂，光纤、紫外激光对 PI 薄膜进行石墨烯的激光直接写入发现了 CO₂ 雕刻的 LIG 样品中形貌显示出截然不同的特征，其特征为互相连通的脊状结构，测得厚度约为 207 μm。这一独特的形态反映了 CO₂ 激光较长波长所带来的增强热影响，从而引起更深的碳化和更明显的材料烧蚀。有助于形成互联的石墨烯图案。相比之下，紫外激光雕刻的厚度只有 135 μm，而光纤激光系统雕刻的 LIG 有约 315 μm。这是因为不同激光系统提供的光束质量和能量密度分布等光热效率存在差异，会直接影响 LIG 的石墨化程度与孔隙结构。激光功率，扫描速度，扫描次数等激光器参数[9] [17]分别决定石墨化程度，LIG 层厚与缺陷密度，电化学活性面积，因此可以通过精准调控可定向设计 LIG 的石墨化程度、孔隙率与官能团含量，使其适配不同生命小分子的直接电化学检测需求。

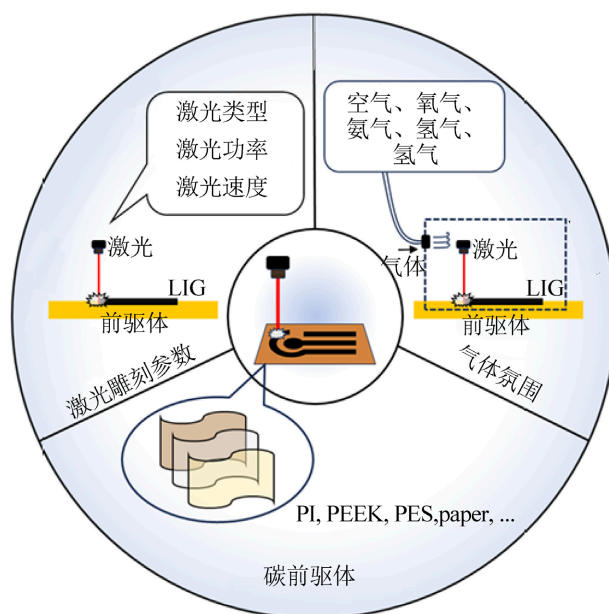


Figure 1. Factors affecting LIG performance [18]

图 1. 影响 LIG 性能的因素[18]

前驱体的选择对于产生高质量的石墨烯也至关重要。有很多材料可以作为激光诱导的前驱体，如聚酰亚胺(PI)、聚酰胺亚胺(PAI)、聚砜(PSU)、聚醚酰亚胺(PEI)、聚苯硫醚(PPS)、聚苯乙烯、酚醛树脂、木质素和纤维素。其中 PI 薄膜作为经典且应用最广的碳前驱体，制得的 LIG 具有石墨化程度高、导电性与柔韧性优异等特点，广受学者研究[4] [8] [16]。Cui 等[18]总结了三个影响 LIG 性能的因素，图 1 中左上方激光刻写参数，包括激光类型、激光功率等；右上方为气体氛围，包含空气、氧气等；下方为碳前驱

体,有聚酰亚胺(PI)、聚醚醚酮(PEEK)等。通过选择合适的条件就能制备出具有良好电化学性能的 LIG 电极。Abdulhafez 团队[19]发现以 PI 膜为碳前驱体,通过倾斜基底结合激光扫速调控,实现了在激光诱导作用下三类 LIG 形貌,约 3000℃发生石墨化,约 3100℃发生石墨烧蚀,极大升温速率产生羊毛状石墨纤维。该研究揭示了 LIG 形成的能控与速控机制,为 LIG 的可控制备提供新机理。

2.2. LIG 的结构特性与直接检测优势

LIG 因激光诱导形成相互连通的三维多孔网状结构[17][19],兼具多孔传输、丰富活性位点与优异导电性能等协同优势,因此成为适用于生命小分子直接电化学检测的理想电极材料。该相互连通的三维多孔结构主要来源于激光光热作用下前驱体的快速热解、气体释放以及碳骨架的重排过程[20]。从微观结构上看,LIG 通常表现为“多孔、多层、随机堆叠”的石墨烯网络,具有大量边缘位点和结构缺陷。高能激光照射 PI 基底时,局部瞬时高温可促使化学键断裂,并驱动碳结构重新交联与快速淬灭,最终形成包含五元环、六元环和七元环的有序石墨化结构,见图 2。该过程不仅揭示了 LIG 由聚合物前驱体向多缺陷石墨烯网络转变的结构演化机制,也为其优异电化学性能提供了结构基础。

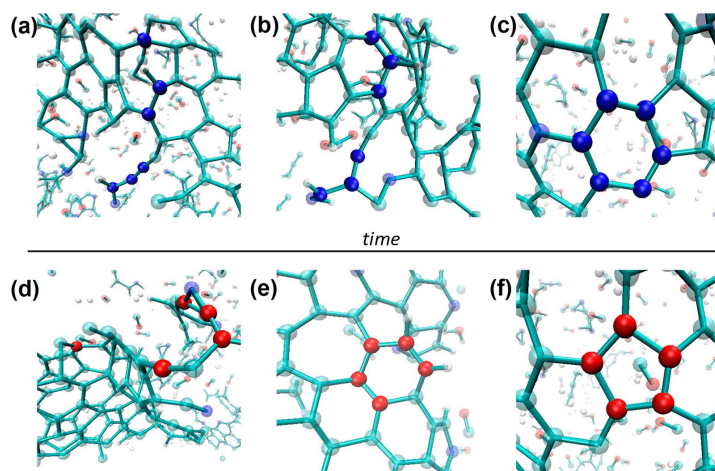


Figure 2. Molecular dynamics snapshots of (a)~(c) 6-member carbon ring formation; (d)~(f) 5-member carbon ring member formation during LIG formation from Kapton [4]

图 2. (a)~(c) 为 6 元碳环形成过程的分子动力学快照; (d)~(f) 为 PI 在形成 LIG 过程中 5 元碳环形成过程的分子动力学快照[4]

这种三维多孔且互连的网络结构一方面显著增大了材料的比表面积,另一方面构建了高效的物质传输通道,能有效缩短电解液与目标生命小分子向电极表面的扩散路径。让更多目标物快速接触活性区域,显著提升检测的响应速率与传质效率。LIG 电化学活性面积占比显著高于传统石墨烯材料,可以实现检测信号的有效放大。同时,LIG 表面存在大量边缘缺陷与含氧官能团(C=O、-OH 等),激光非均相热反应能使碳前驱体形成边缘平面石墨化[3],且通过调控激光参数可实现含氧官能团含量的精准调节,缺陷密度与含氧官能团数量呈正相关,这些活性位点能有效降低目标分子氧化还原的过电位,促进电子的快速传递,降低复杂基质中大分子的干扰影响,LIG 对过氧化氢、多巴胺等小分子的本征催化性能显著提升[3][21],提供了直接检测结构基础。

2.3. LIG 电极的构型设计

LIG 电极的构型设计是决定其电化学传感性能与应用场景的重要因素。目前,LIG 电极的主流构型仍以三电极体系[16][17]为核心,同时结合激光图案化加工工艺,进一步发展出单电极、叉指电极、多工

作电极以及面向柔性可穿戴场景的集成化构型。总体来看, LIG 电极构型正由基础检测单元向小型化、集成化、多功能化方向不断演进。

从基础结构看, 较为简单的 LIG 电极通常采用单工作电极构型, 即仅在单一圆形或特定图案的工作电极区域内完成目标物的电化学反应与信号输出, 如图 3(A)、图 3(B)所示。该类构型结构简单、制备方便, 适用于单一目标物的初步检测与机理验证。随着检测精度和体系稳定性要求的提高, 三电极体系逐渐成为 LIG 电化学传感器中最常用、最成熟的构型。该体系由工作电极、对电极和参比电极集成构成, 可有效实现待测物的电化学反应、体系电流传导以及稳定电位参考, 兼具体积小、功能集成度高和制造成本低等优势, 因此成为当前 LIG 电极设计的主流形式, 如图 3(C)、图 3(D)所示。

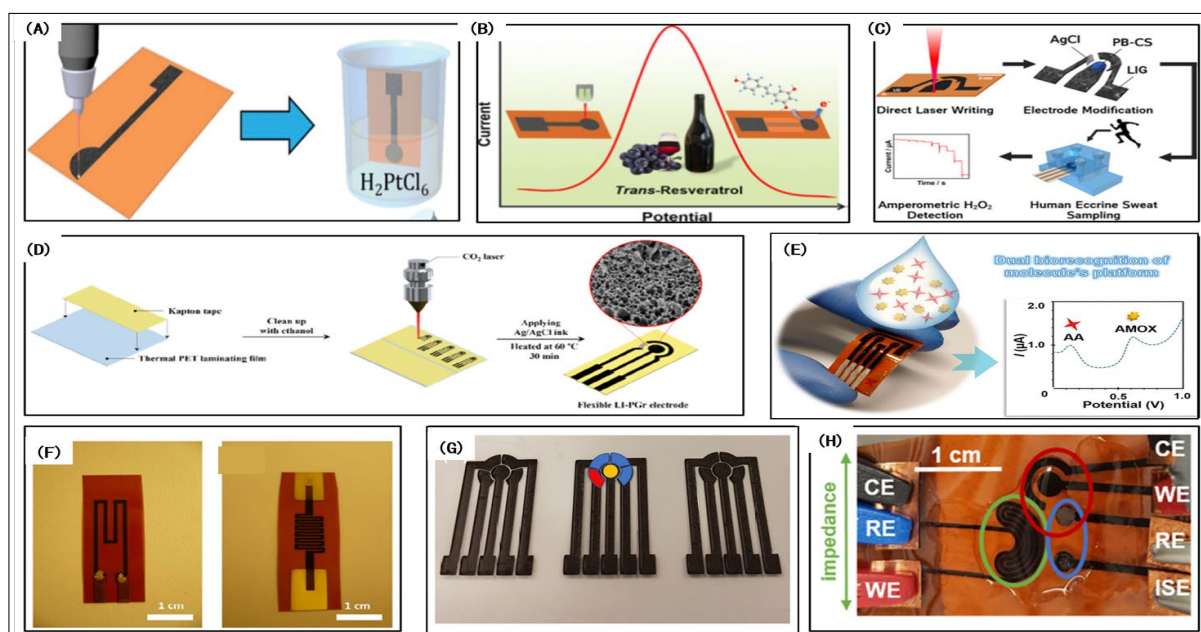


Figure 3. Schematic illustrations of typical LIG electrode configurations and their applications: (A) CO₂ laser conversion of PI into graphene with Pt particle deposition [22]; (B) a single-electrode sensor for resveratrol detection in wine [23]; (C) a three-electrode LIG-based amperometric sensor for hydrogen peroxide in skin analysis [24]; (D) typical three-electrode pattern for methamphetamine detection [25]; (E) dual working electrodes for simultaneous detection of ascorbic acid and amoxicillin [26]; (F) flow sensor and temperature sensor [27]; (G) highly conductive nitrogen-doped graphene sensor with three working electrodes [28]; (H) integrated LIG sensor for sweat analysis [29]

图 3. LIG 电极典型构型及其应用示意图: (A) CO₂ 激光转化 PI 为石墨烯并沉积 Pt 粒子[22]; (B) 一种检测葡萄酒中白藜芦醇的单电极传感器[23]; (C) 三电极式 LIG 的过氧化氢皮肤安培传感器[24]; (D) 用于检测甲基苯丙胺的典型三电极图案[25]; (E) 双工作电极检测抗坏血酸和阿莫西林[26]; (F) 流量传感器和温度传感器[27]; (G) 高导电性氮掺杂石墨烯三工作电极传感器[28]; (H) 组合式汗液分析 LIG 传感器[29]

Xia 等[30]基于三电极体系构建了用于植物液体检测的电化学生物芯片, 如图 4 所示。该器件以 LIG 工作电极为核心检测区域, 通过酶层修饰实现对过氧化氢的特异性识别, 从而完成目标物质的监测与电催化反应; LIG 对电极用于传导电流并维持体系电荷平衡, 保障氧化还原过程持续进行; Ag/AgCl 参比电极则提供稳定的电位参考, 减少检测过程中电位漂移带来的误差, 从而显著提高直接检测的准确性与结果重复性。该研究表明, 三电极集成构型能够较好地兼顾检测灵敏度、稳定性和实际应用可行性, 是 LIG 电极构型设计的核心基础。

在此基础上, 研究者们进一步通过图案化设计对工作电极区域进行功能拓展, 使 LIG 电极由单一分析对象检测发展为多组分同步检测。例如, 通过对工作电极进行差异化修饰, 可实现对不同物质的同时

识别与检测。图 3(E)展示了一种用于同时检测阿莫西林和抗坏血酸的传感器设计；图 3(G)则体现了多工作电极模式在 LIG 平台中的应用，可用于葡萄糖、乳酸和酒精多种目标物的同步检测。这类多电极或多工作区构型显著提升了单芯片的检测通量与信息集成能力，更适合复杂体系分析和可穿戴连续监测等应用场景。

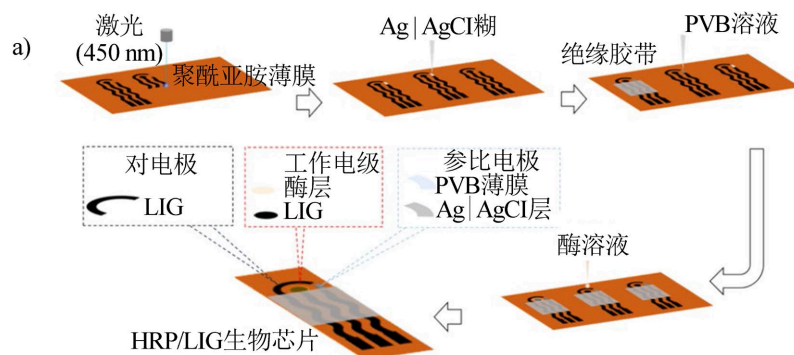


Figure 4. Schematic diagram of the LIG three-electrode system configuration [30]

图 4. LIG 三电极体系构型示意图[30]

此外，LIG 电极的图案设计并不限于传统电化学分析，还可拓展至其他柔性传感领域，如图 3(F)所示，其在流量传感器和温度传感器中同样表现出良好的结构适配性与功能可设计性。由此可见，LIG 电极构型设计已从单一检测电极逐步发展为兼具高集成度、多目标分析能力和跨场景应用潜力的多样化平台，为后续柔性传感器和可穿戴器件的发展提供了重要基础。

2.4. LIG 直接检测的电化学原理

LIG 直接检测主要指的是目标分析物在 LIG 电极表面发生直接的电化学反应(氧化或还原)，产生可测量的电信号(电流、电位或阻抗变化)，无需任何中间转换层或生物识别元件。LIG 直接检测的原理大致可以分为三部分，首先是碳前驱体(如 PI 膜等)在激光诱导作用下，形成具有三维结构的多孔的石墨烯。其次是引入生命小分子后，会与 LIG 表面缺陷、含氧/氮官能团特异性作用，在电解液中引发电化学信号改变。最后是结合 LIG 高活性面积与电子转移优势，可实现对小分子的选择性、高灵敏定性定量检测。

3. LIG 直接检测生命小分子的研究进展

3.1. 活性氧物种：过氧化氢

过氧化氢(Hydrogen peroxide, H_2O_2)作为一种典型的生命小分子，在生物体内兼具信号调控与氧化损伤的双重角色，因此对其准确检测具有重要的生物学意义和公共卫生价值。作为细胞内重要的活性氧物种， H_2O_2 在细胞分化、增殖、免疫应答及信号传导等生理过程中发挥着关键的调控作用。然而，当机体受到外界刺激或代谢紊乱时， H_2O_2 的过量产生会导致氧化应激状态，其强氧化性可损害细胞内的 DNA、蛋白质等生物大分子，进而引发基因突变甚至癌症。因此，建立 H_2O_2 的快速、灵敏检测方法，将为食品安全监测、疾病早期诊断及临床治疗评估等多个领域提供关键的技术支撑。LIG 电极的表面边缘缺陷、 sp^2 碳位点及含氧官能团可共同参与 H_2O_2 的电化学还原过程，为其提供吸附位点和电子传递通道， H_2O_2 分子吸附在 LIG 表面，从电极得到 2 个电子，可直接还原为水。Shen 等[7]制备了银纳米颗粒复合 LIG 电极，通过建立无酶 LIG 传感体系，证实 H_2O_2 在 LIG 表面的直接电还原路径，银位点与 LIG 边缘位点协同加速电子转移。电极检测 H_2O_2 的线性范围为 1~110 μM 、110~800 μM ，检出限 0.24 μM ，灵敏度 118.7

$\mu\text{A}\cdot\text{mM}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。在此基础上, Barber 等[24]进一步将 LIG 与普鲁士蓝(PB)/壳聚糖(CS)复合层相结合制备的 PB-CS/LIG 柔性集成传感器, 针对 H_2O_2 检测展现出优异性能: 在人体外分泌汗液体系中, H_2O_2 检测线性范围为 $10\sim 1000\ \mu\text{M}$, 检出限低至 $6.31\ \mu\text{M}$; 以 $-0.036\ \text{V}$ 低电位工作, 有效避免溶解氧及抗坏血酸、尿酸等常见物质的干扰; 对人体汗液中 H_2O_2 的检测回收率达 98.73% , 且传感器稳定性优异, 储存 14 天仍能保持 73.2% 的响应性能, 机械弯折后对 H_2O_2 的检测性能也无明显衰减, 实现了复杂生物体液中 H_2O_2 的稳定、灵敏、特异性检测。

3.2. 能量代谢标志物: 葡萄糖

葡萄糖是自然界中分布最广且最为重要的一种单糖, 用途十分广泛。在人体中, 葡萄糖能起到快速补充能量、促进肝脏解毒、加强记忆等作用, 并且葡萄糖能够通过体内多种酶被转化最终生成复杂代谢产物[31][32], 葡萄糖的浓度对生理活动有很大影响, 因此可作为血管疾病等一系列疾病的检测指标。发展高灵敏、低侵入、可穿戴的葡萄糖检测技术具有重要的临床应用价值。通过与金属催化层耦合 LIG 在葡萄糖检测中可构建更高效无酶电催化界面。Zhu 等[33]以 PI 薄膜为基底, 通过 CO_2 激光刻蚀制备三维多孔 LIG 泡沫型、纤维型电极, 经化学镀镍和金双金属层修饰, 集成含碱性溶液的多孔封装反应腔与皮肤适配微流控组件, 开发出高性能无酶葡萄糖传感器, 该 LIG 传感器纤维型、泡沫型灵敏度分别达 $3500\ \mu\text{A}\cdot\text{mM}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $1080\ \mu\text{A}\cdot\text{mM}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, $0.5\ \text{V}$ 检测电位下线性范围 $0\sim 4\ \text{mM}$ 、检测限低至 $1.5\ \mu\text{M}$, 在 $0.1\ \text{V}$ 检测电位下线性范围拓展至 $0\sim 30\ \text{mM}$, 该传感器具备优良的机械与电化学稳定性、强抗干扰性, 可精准检测细胞培养液及人体汗液中的葡萄糖, 无需样本为碱性环境, 成功解决传统非酶传感器对外部强碱性条件依赖, 为无创可穿戴血糖监测提供了新思路。Dai 团队[9]成功构建了一种结合原位电化学沉积 Cu_2O 纳米立方体的高性能 LIG 传感器, 表现出更低的电荷转移电阻以及增强的抗氧化性能, 包括高灵敏度、快速电流响应以及显著的长期稳定性。该传感器对常见干扰物(如尿酸和抗坏血酸)表现出出色的抗干扰能力, 并具有优异的机械柔韧性(超过 100 次弯曲循环仍保持较好的检测稳定性)。研究进一步指出, 电沉积过程中形成 Cu-O-C 共价键所产生的强界面键合, 有效地抑制了铜的氧化, 提高了该传感器的抗氧化性, 展现出 LIG 电极材料极佳的兼容性。传感器灵敏度达 $113\ \mu\text{A}\cdot\text{mM}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, 线性检测区间为 $0.6\sim 10.0\ \text{mM}$, 检测限 $0.272\ \mu\text{M}$, 4 周长期存储后仍保留 90.3% 的初始响应。

3.3. 神经递质: 多巴胺

多巴胺(dopamine, DA), 又称 3-羟酪胺, 属儿茶酚胺类神经递质。主要参与躯体运动的调节、奖赏与动机、情绪调控、认知与注意力等过程。其代谢异常与帕金森病等神经系统疾病密切相关, 患者通常表现为震颤、僵直、运动迟缓等症状。由于多巴胺与抗坏血酸、尿酸等生物分子在电化学氧化电位上往往接近, 高选择性检测的关键在于电极表面结构与界面电荷环境的精准调控, LIG 表面的含氧位点通过静电作用和 $\pi\text{-}\pi$ 相互作用增强对多巴胺分子的选择性吸附, 通过界面电荷调控抑制抗坏血酸的氧化干扰, Santos 等[34]通过调控激光参数制备富含表面缺陷与含氧基团的 LIG 电极。证实激光工艺可定向调控 LIG 表面含氧结构, 为实现高选择性、高抗干扰多巴胺传感提供了重要依据。Yuan 等[35]开发了一种便携式微型电化学传感器, 通过紫外激光刻蚀 PI 薄膜制备 LIG 电极, 经 $0.1\ \text{M}\ \text{NaOH}$ 溶液中 $2\ \text{V}$ 电位极化 $60\ \text{s}$ 修饰, 搭配银镜反应制备的伪 Ag/AgCl 参比电极, 无需额外纳米材料修饰, 采用差分脉冲伏安法可同时测定抗坏血酸(AA)、多巴胺(DA)、尿酸(UA), 并且三者氧化峰分离良好, AA 线性范围 $10\sim 5000\ \mu\text{M}$ (检出限 $1.43\ \mu\text{M}$)、DA 为 $0.1\sim 6000\ \text{nM}$ (检出限 $6.83\ \text{nM}$)、UA 为 $10\sim 8000\ \text{nM}$ (检出限 $1.07\ \text{nM}$), 该传感器还具备优良的、重复性和稳定性, 在实际尿液样品检测中 LIG 集成电极回收率达 $94.6\%\sim 109.3\%$, 适用于即时检测场景。

3.4. 其他生命小分子

LIG 电化学传感器在尿酸、抗坏血酸、对乙酰氨基酚等生命小分子的直接检测中同样展现出良好的应用效果。通过本征催化性能调控或表面功能化修饰,可实现对这类小分子的高灵敏度、高选择性检测,为痛风诊断、维生素含量分析、药物浓度监测等领域提供了新型检测技术支撑。通过添加纳米颗粒等修饰方法可以提高 LIG 电极的选择性。Isa Anshori 等[36]通过水热法合成还原氧化石墨烯/银铂双金属纳米复合材料,并将其修饰于纯 LIG 电极表面制备尿酸电化学生物传感器,采用差分脉冲伏安法检测尿酸时,线性范围为 0.1~2000 μM ,检出限低至 3.75 μM ,灵敏度达 1.76 $\mu\text{A}\cdot\mu\text{M}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$,对维生素 C、葡萄糖等干扰物选择性优良,连续 30 次循环检测稳定性良好,适应了人体汗液、尿液、血液等体液中尿酸的检测时的复杂环境,为高尿酸血症等疾病的早期筛查提供了低成本、环保且高性能的方案。Kishore Pushparaj 等[37]将卟啉/氧化锌纳米颗粒修饰于 LIG 电极,实现抗坏血酸检测的高灵敏。检测限达 3 nM,并可有效排除多巴胺干扰,为复杂基质抗坏血酸精准检测提供新方案。但卟啉负载稳定性与长期循环寿命有限,生物体液适配性与抗干扰谱有待拓展。Baachaoui 等[38]以聚酮亚胺膜为碳前驱体制备 LIG 电极,依托其多孔结构与高电化学活性面积实现对乙酰氨基酚的电化学检测;并通过金纳米颗粒对 LIG 电极进行表面功能化修饰,进一步提升电极的异相电子转移速率,优化检测性能。实现了对乙酰氨基酚 50~600 μM 的线性检测,检测限低至 14.3 μM ;金纳米颗粒修饰后检测限降至 1.1 μM 。

3.5. 实际生物样品中的直接检测

在实验室标准溶液体系中完成传感材料构筑与检测条件优化后,基于 LIG 电极的电化学传感器已逐步拓展至复杂实际样品的直接检测。陈识[39]以 LIG 为核心传感材料,开展了多参数汗液传感器的设计与研发。通过调控 LIG 的制备工艺,包括激光参数和前驱体选择,优化了材料的多孔结构与电化学活性,实现了对汗液中葡萄糖和尿酸等多种生理指标的同步检测。Ma 等[40]开发的原位镍掺杂 LIG (Ni-LIG)电极,可直接用于汗液中尿酸的无创检测。在人工汗液模拟体系中,其线性范围达到 0~40 μM ,检测限低至 0.12 μM ;对 3 名健康志愿者汗液样本的检测结果与商用试剂盒高度吻合($P > 0.05$),且在室温储存 1 个月后仍能保持 94.7%的信号稳定性。研究表明,基于 LIG 电极的电化学传感器已逐步从实验室研究走向实际样品分析,并展现出良好的商业化与规模化应用潜力。

为更直观地展示不同激光类型、波长、前驱体材料及电化学检测方法在实际样品分析中的应用效果,表 1 汇总了近年来 LIG 电极用于过氧化氢、葡萄糖、抗坏血酸、多巴胺、尿酸、乙酰氨基酚等目标物检测的代表性研究,更直观地展示不同激光类型、波长、前驱体材料及电化学检测方法在实际样品分析中的应用效果。总体来看,不同 LIG 传感平台普遍表现出较宽的检测范围和较低的检测限,说明其在复杂基质中仍具有较好的灵敏度、稳定性和应用前景。

Table 1. Representative research on electrochemical sensors based on LIG electrodes in direct detection of actual biological samples

表 1. 基于 LIG 电极的电化学传感器在实际生物样品直接检测中的代表性研究

激光类型 (工作介质)	波长	前驱体	检测方法	检测物质	检测范围	最低检测限	参考文献
IR (CO ₂)	10.6 μm	PET	计时电流法	过氧化氢	1~110 μM	0.24 μM	[7]
					110~800 μM	0.31 μM	
IR (CO ₂)	10.6 μm	PI	计时电流法	葡萄糖	0.0003~2.1 mM	300 nM	[41]
IR (CO ₂)	10.6 μm	PI	方波伏安法	抗坏血酸	1.5~4 mM	—	[26]
				阿莫西林	50nM~100 μM	11.98 nM	

续表

UV	355 nm	PI	差分脉冲伏安法	抗坏血酸	10~5000 μM	1.43 μM	[35]
				多巴胺	0.1~6000 μM	6.83 nM	
				尿酸	10~8000 nM	1.07 nM	
IR (CO ₂)	10.6 μm	PI	差分脉冲伏安法	多巴胺	2~20 μM	0.37 mM	[42]
				尿酸	5~50 μM	0.71 μM	
IR (CO ₂)	1064 nm	PI	计时电流法	过氧化氢	0.5~5000 μM	0.1 mM	[43]
IR (CO ₂)	1064 nm	PI	计时电流法	过氧化氢	0.01~2.61 mM	2.8 μM	[44]
IR (CO ₂)	10.6 μm	软木	方波伏安法	亚硝酸钠	300~1000 μM	14.4 μM	[45]
IR (CO ₂)	10.6 μm	纤维素纸	差分脉冲伏安法	酪氨酸	30~1000 μM	12.4 μM	[46]
				尿酸	5~100 μM	2.9 μM	
VIS	405 nm	壳聚糖生物膜	计时电流法	过氧化氢	3 μM ~1 mM	1.9 μM	[47]
				葡萄糖	25~300 μM	9.6 μM	
IR (CO ₂)	10.6 μm	PI	方波伏安法	乙酰氨基酚	10~150 μM	1.58 μM	[48]

4. 挑战与展望

4.1. 直接检测面临的挑战

尽管 LIG 的电化学传感平台在快速分析与原位监测领域展现出良好的应用潜力，但在面向真实体系的直接检测过程中，仍存在若干亟待突破的科学问题与技术瓶颈。当前 LIG 电极检测技术面临三大核心挑战：一是复杂样品基质中蛋白质、多糖等共存物质易在电极表面竞争吸附，导致 LIG 多孔通道堵塞和活性位点遮蔽，造成选择性不足，影响检测准确性；二是长期工作、电位循环扫描及复杂环境会引发传感界面结构脱落与结合强度下降，加之激光制备工艺参数波动导致电极形貌差异，造成长期稳定性与批次重现性不佳；三是现有结构在超痕量检测中电子传递效率与信号增强效果不足，受背景电流干扰和弱信号响应限制，检出下限难以降低，制约了高灵敏精准检测的实现

4.2. 未来发展方向

未来 LIG 电化学传感器将逐步向柔性化、阵列化、集成化与便携化方向持续发展。通过对电极结构进行合理设计并开展界面功能改性，可进一步提升材料的柔韧性与生物相容性，从而实现对各类生理指标的长期、稳定、连续监测。针对多组物质同步检测的需求，可搭建多功能电化学传感阵列，结合特异性分子修饰技术，实现多种目标物的高选择性、高效率并行分析。同时，依托微流控芯片技术推进系统级集成设计，增强传感界面与芯片体系的兼容性，提升检测过程自动化程度，最终完成样品前处理、传输与检测的全流程一体化。面向现场快速检测需求，可将传感单元与低功耗电路、智能数据处理算法相结合，增强体系抗干扰能力与运行稳定性，推动 LIG 基传感器在环境监测、食品安全、即时诊断等实际场景中实现真正的落地与应用

5. 结语

综上，LIG 材料凭借三维多孔结构与优异电子传输性能，可构筑高活性电化学传感界面，有效提升信号转换效率并降低背景干扰，为生命小分子原位快速检测提供新型技术路径，实现目标物快速、灵敏、精准的实时定量分析。LIG 电极传感检测体系在生命小分子分析领域具有显著技术优势和广阔应用前景，

相较于传统大型仪器, LIG 电化学生物传感器具有制备简单、集成便携、试剂消耗少、环境友好等优势, 既能满足实验室高精度检测需求, 又可在资源有限地区、野外应急及家庭筛查等场景推广, 拓展了生命小分子检测的应用范围与技术形式。从发展趋势看, LIG 直接检测体系符合绿色分析、低成本检测的行业导向, 在生命小分子检测领域潜力巨大。通过表面功能化修饰可实现复杂基质中多组分同步特异性识别, 结合物联网与人工智能技术, 将推动传感终端向智能化、集成化、微型化与便携化发展, 加快技术转化进程, 为食品安全监管、生态环境监测及生物医学研究提供可靠技术支撑。

参考文献

- [1] Wang, X., Zhang, Y., Zhi, C., Wang, X., Tang, D., Xu, Y., *et al.* (2013) Three-dimensional Strutted Graphene Grown by Substrate-Free Sugar Blowing for High-Power-Density Supercapacitors. *Nature Communications*, **4**, Article No. 2905. <https://doi.org/10.1038/ncomms3905>
- [2] Trusovas, R., Račiukaitis, G., Niaura, G., Barkauskas, J., Valušis, G. and Pauliukaite, R. (2015) Recent Advances in Laser Utilization in the Chemical Modification of Graphene Oxide and Its Applications. *Advanced Optical Materials*, **4**, 37-65. <https://doi.org/10.1002/adom.201500469>
- [3] Cambaz, Z.G., Yushin, G., Osswald, S., Mochalin, V. and Gogotsi, Y. (2008) Noncatalytic Synthesis of Carbon Nanotubes, Graphene and Graphite on Sic. *Carbon*, **46**, 841-849. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.02.013>
- [4] Lin, J., Peng, Z., Liu, Y., Ruiz-Zepeda, F., Ye, R., Samuel, E.L.G., *et al.* (2014) Laser-Induced Porous Graphene Films from Commercial Polymers. *Nature Communications*, **5**, Article No. 5714. <https://doi.org/10.1038/ncomms6714>
- [5] Wang, F., Wang, K., Zheng, B., Dong, X., Mei, X., Lv, J., *et al.* (2018) Laser-Induced Graphene: Preparation, Functionalization and Applications. *Materials Technology*, **33**, 340-356. <https://doi.org/10.1080/10667857.2018.1447265>
- [6] Saktaphetsiri, K., Thaweekulchai, T., Sukmas, W., Wang, J., Schulte, A. and Rodthongkum, N. (2025) Laser-Induced Graphene Electrode Modified by Platinum Nanoparticle/Zein/Gelatin/glucose Oxidase for Non-Invasive Glucose Sensor in Multiple Biofluids. *Analytica Chimica Acta*, **1353**, Article ID: 343974. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.343974>
- [7] Shen, H., Liu, J., Pan, P., Yang, X., Yang, Z., Li, P., *et al.* (2023) One-Step Synthesis of Nanosilver Embedding Laser-Induced Graphene for H₂O₂ Sensor. *Synthetic Metals*, **293**, Article ID: 117235. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2022.117235>
- [8] 刘辉龙. 石墨烯柔性电极微纳结构激光制造及微超级电容应用研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [9] Dai, B., Pan, Z., Zhuang, R., Yin, H., Zhang, H., Qie, W., *et al.* (2025) Laser-Induced Graphene/Cu₂O Flexible Electrode for High-Performance Glucose Sensing. *Chemical Physics Letters*, **878**, Article ID: 142383. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2025.142383>
- [10] Wu, J., Yang, Y., Chang, S., Wei, Y., Wang, Y., Qiu, F., *et al.* (2026) Pyrrole-Based Materials for Electrochemical Sensors and Fluorescent Probes in Food Safety Detection. *Analytical Chemistry*, **98**, 6413-6440. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5c07434>
- [11] 孙国瀚. 基于纳米复合材料电化学传感器的构建及其在中药有害物质分析中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东药科大学, 2019.
- [12] 黄晴雯. 真菌毒素的分析方法及风险评估研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [13] 于开宁, 王润忠, 刘丹丹. 水环境中新污染物快速检测技术研究进展[J]. 岩矿测试, 2023, 42(6): 1063-1077.
- [14] Dinesh, G., Hemakumar, V.S., Muthevi, A.K., Kapila, D., Kumar, N.V.P.S. and Kumar, K.V. (2025) Dual-Channel CNN-Enhanced Electrochemical Sensing Using Graphene Platforms for Ultra-Trace Organic Pollutant Detection. *Microchemical Journal*, **218**, Article ID: 115330. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115330>
- [15] Zakiyyah, S.N., Irkham, Wulandari, D.A., Zein, M.I.H.L., Gaffar, S., Ozsoz, M., *et al.* (2026) CRISPR-Cas13a-Powered Electrochemical Biosensor for Label-Free Detection of Chikungunya Virus RNA Using a Ceria-Modified Screen-Printed Carbon Electrode. *ACS Sensors*, **11**, 923-938. <https://doi.org/10.1021/acssensors.5c01924>
- [16] Barjinkhabbaz, M., Nankali, M., Ali, M., Peng, P., Pope, M. and Kamkar, M. (2026) CO₂, Fiber, and UV Direct Laser Writing of Graphene for Flexible EMI Shielding Applications: A Comparative Study. *Journal of Applied Polymer Science*, **143**, e70292. <https://doi.org/10.1002/app.70292>
- [17] Ohara, K., Ando, R., Shimada, K., Kishimoto, T., Nakashima, R. and Takahashi, H. (2025) Laser-Induced Graphene Cantilever Airflow Sensor Fabricated via Laser Cutting and Folding a Copper-Polyimide Film. *Advanced Sensor*

- Research*, **4**, e00091. <https://doi.org/10.1002/adsr.202500091>
- [18] Cui, X., Gu, T., Ma, K., Zeng, J. and Xia, H. (2025) Laser-Induced Graphene Electrochemical Sensors: An Emerging Platform for Agri-Food and Environmental Detection. *Chemosensors*, **13**, Article 432. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13120432>
- [19] Abdulhafez, M., Tomaraei, G.N. and Bedewy, M. (2026) Kinetic Effects and Ablation Thresholds in Laser-Induced Graphene. *Carbon*, **246**, Article ID: 120941. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120941>
- [20] Vashisth, A., Kowalik, M., Geringer, J.C., Ashraf, C., van Duin, A.C.T. and Green, M.J. (2020) Reaxff Simulations of Laser-Induced Graphene (LIG) Formation for Multifunctional Polymer Nanocomposites. *ACS Applied Nano Materials*, **3**, 1881-1890. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b02524>
- [21] 汤勇, 刘辉龙, 陆龙生, 等. 激光加工平面型微超级电容器的研究进展与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 189-206.
- [22] Johnson, Z.T., Jared, N., Peterson, J.K., Li, J., Smith, E.A., Walper, S.A., *et al.* (2022) Enzymatic Laser-Induced Graphene Biosensor for Electrochemical Sensing of the Herbicide Glyphosate. *Global Challenges*, **6**, Article ID: 2200057. <https://doi.org/10.1002/gch2.202200057>
- [23] Zhang, C., Ping, J. and Ying, Y. (2020) Evaluation of Trans-Resveratrol Level in Grape Wine Using Laser-Induced Porous Graphene-Based Electrochemical Sensor. *Science of the Total Environment*, **714**, Article ID: 136687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136687>
- [24] Barber, R., Davis, J. and Papakonstantinou, P. (2023) Stable Chitosan and Prussian Blue-Coated Laser-Induced Graphene Skin Sensor for the Electrochemical Detection of Hydrogen Peroxide in Sweat. *ACS Applied Nano Materials*, **6**, 10290-10302. <https://doi.org/10.1021/acsnm.3c01199>
- [25] Saisahas, K., Soleh, A., Somsiri, S., Senglan, P., Promsuwan, K., Saichanapan, J., *et al.* (2021) Electrochemical Sensor for Methamphetamine Detection Using Laser-Induced Porous Graphene Electrode. *Nanomaterials*, **12**, Article 73. <https://doi.org/10.3390/nano12010073>
- [26] Marques, A.C., Cardoso, A.R., Martins, R., Sales, M.G.F. and Fortunato, E. (2020) Laser-Induced Graphene-Based Platforms for Dual Biorecognition of Molecules. *ACS Applied Nano Materials*, **3**, 2795-2803. <https://doi.org/10.1021/acsnm.0c00117>
- [27] Marengo, M., Marinaro, G. and Kosel, J. (2017) Flexible Temperature and Flow Sensor from Laser-Induced Graphene. 2017 *IEEE SENSORS*, Glasgow, 29 October-1 November 2017, 1-3. <https://doi.org/10.1109/icsens.2017.8234429>
- [28] Lei, Y., Alshareef, A.H., Zhao, W. and Inal, S. (2019) Laser-Scribed Graphene Electrodes Derived from Lignin for Biochemical Sensing. *ACS Applied Nano Materials*, **3**, 1166-1174. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b01795>
- [29] Bauer, M., Wunderlich, L., Weinzierl, F., Lei, Y., Duerkop, A., Alshareef, H.N., *et al.* (2020) Electrochemical Multi-Analyte Point-Of-Care Perspiration Sensors Using On-Chip Three-Dimensional Graphene Electrodes. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **413**, 763-777. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02939-4>
- [30] Xia, H., Cui, X., Liu, S., Qiu, D., Gu, T., Zhou, J., *et al.* (2025) *In-Situ*-Formed Porous Laser-Induced Graphene-Based Enzymatic Electrochemical Biochips for Direct and Sensitive Determination of H₂O₂ in Plant Fluids. *Microchemical Journal*, **219**, Article ID: 116097. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.116097>
- [31] 程川川, 马保凯, 程永发, 等. 辣根过氧化氢酶-金属有机骨架纳米纤维复合物生物传感器的制备及其用于食品中过氧化氢残留检测的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 199-204, 212.
- [32] 丁凯欣. 肝脏 ALKBH5 整合调控葡萄糖和脂质稳态的作用机制研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [33] Zhu, J., Liu, S., Hu, Z., Zhang, X., Yi, N., Tang, K., *et al.* (2021) Laser-Induced Graphene Non-Enzymatic Glucose Sensors for On-Body Measurements. *Biosensors and Bioelectronics*, **193**, Article ID: 113606. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113606>
- [34] Santos, N.F., Pereira, S.O., Moreira, A., Girão, A.V., Carvalho, A.F., Fernandes, A.J.S., *et al.* (2021) IR and UV Laser-induced Graphene: Application as Dopamine Electrochemical Sensors. *Advanced Materials Technologies*, **6**, Article ID: 2100007. <https://doi.org/10.1002/admt.202100007>
- [35] Yuan, X., Wu, X., Li, S., Liu, R. and Ling, Y. (2024) A Portable Microelectrochemical Sensor Based on Potentiostatic Polarization-Treated and Laser-Induced Graphene for the Simultaneous Determination of Ascorbic Acid, Dopamine, and Uric Acid. *Langmuir*, **40**, 25529-25538. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c03269>
- [36] Anshori, I., Adzkie, A.R., Uperianti, Harimurti, S., Handayani, N., Suendo, V., *et al.* (2025) Uric Acid Electrochemical Biosensor Based on a Laser-Induced Graphene Electrode Modified with a Honey-Mediated Nanocomposite of Reduced Graphene Oxide and Bimetallic Silver-Cobalt. *RSC Advances*, **15**, 39431-39442. <https://doi.org/10.1039/d5ra04596g>
- [37] Pushparaj, K., Catini, A., Capuano, R., Allegra, V., Magna, G., Antonelli, G., *et al.* (2024) Nonenzymatic Potentiometric Detection of Ascorbic Acid with Porphyrin/ZnO-Functionalized Laser-Induced Graphene as an Electrode of EGFET

- Sensors. *ACS Omega*, **9**, 10650-10659. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09141>
- [38] Baachaoui, S., Mabrouk, W., Charradi, K., Slimi, B., Ramadan, A.M., Elsamra, R.M.I., *et al.* (2023) Laser-Induced Porous Graphene Electrodes from Polyketimine Membranes for Paracetamol Sensing. *Royal Society Open Science*, **10**, Article ID: 230294. <https://doi.org/10.1098/rsos.230294>
- [39] 陈识. 基于激光诱导石墨烯的多参数汗液传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [40] Ma, N., Liu, Q., Cai, N., Zhu, F., Gan, N. and Yu, Z. (2026) In-situ Laser-Induced Metal (M = Fe, Co, Ni, Cu)-Doped Graphene Electrode for Sensitive Uric Acid Sensing in Sweat. *Analytica Chimica Acta*, **1390**, Article ID: 345130. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2026.345130>
- [41] Yoon, H., Nah, J., Kim, H., Ko, S., Sharifuzzaman, M., Barman, S.C., *et al.* (2020) A Chemically Modified Laser-Induced Porous Graphene Based Flexible and Ultrasensitive Electrochemical Biosensor for Sweat Glucose Detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **311**, Article ID: 127866. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127866>
- [42] Ouedraogo, B., Baachaoui, S., Tall, A., Tapsoba, I. and Raouafi, N. (2023) Laser-Induced Graphene Electrodes on Polyimide Membranes Modified with Gold Nanoparticles for the Simultaneous Detection of Dopamine and Uric Acid in Human Serum. *Microchimica Acta*, **190**, Article No. 316. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05909-6>
- [43] Zhang, Y., Zhu, H., Sun, P., Sun, C., Huang, H., Guan, S., *et al.* (2019) Laser-Induced Graphene-Based Non-Enzymatic Sensor for Detection of Hydrogen Peroxide. *Electroanalysis*, **31**, 1334-1341. <https://doi.org/10.1002/elan.201900043>
- [44] Zhao, G., Wang, F., Zhang, Y., Sui, Y., Liu, P., Zhang, Z., *et al.* (2021) High-Performance Hydrogen Peroxide Microsensors Based on Laser-Induced Fabrication of Graphene@Ag Electrodes. *Applied Surface Science*, **565**, Article ID: 150565. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150565>
- [45] Germinare, B.F., Fernandes-Junior, W.S., Camargo, J.R. and Janegitz, B.C. (2025) Cork-Based Electrochemical Sensors Obtained by Laser-Induced Graphene: A Green Alternative for Sodium Nitrite Detection in Beverage Samples. *Microchimica Acta*, **192**, Article No. 611. <https://doi.org/10.1007/s00604-025-07471-9>
- [46] Ghavipankeh, A., Sadeghzadeh, S., Naghib, S.M. and Dashtian, K. (2025) Flexible Laser-Induced Graphene Microelectrochemical Sensor on Sustainable Cellulosic Paper Substrate for Sensitive Detection of Uric Acid and Tyrosine in Sweat. *Langmuir*, **42**, 7027-7038. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c03922>
- [47] Hamidi, H., Levieux, J., Larrigy, C., Russo, A., Vaughan, E., Murray, R., *et al.* (2023) Laser Induced Graphene (LIG) Biosensors Derived from Chitosan: Towards Sustainable and Green Electronics. *Biosensors and Bioelectronics: X*, **15**, Article ID: 100403. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2023.100403>
- [48] Lahcen, A.A., Sher, M., Ameer, S. and Slaughter, G. (2025) Laser-Induced Graphene Sensor for the Electrochemical Detection of Acetaminophen. *ChemistrySelect*, **10**, e02914. <https://doi.org/10.1002/slct.202502914>