

基于多孔材料异质结光电化学传感器的构建研究

王佳玥

南京邮电大学材料科学与工程学院 江苏南京

【摘要】本文主要研究多孔材料异质结光电化学传感器的构建。详细阐述了该传感器的工作原理，分析了多孔材料及异质结在提高传感器性能方面的独特优势。通过研究与对比几种制备方法，明确不同方法对传感器性能的影响。与此同时，也针对传感器的性能优化，结合具体应用场景，进行了探讨，显示了其在环境监测，生物分析等领域的应用潜力。并以此为基础为多孔材料异质结光电化学传感器的进一步发展与应用提供理论支持与实践指导。

【关键词】多孔材料；异质结；光电化学传感器；性能优化；应用

【收稿日期】2025 年 2 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250104

Research on the construction of heterojunction photoelectrochemical sensors based on porous materials

Jiayue Wang

School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】 This paper focuses on the construction of heterojunction photoelectrochemical sensors based on porous materials. It provides a detailed explanation of the working principle of these sensors and analyzes the unique advantages of porous materials and heterojunctions in enhancing sensor performance. By comparing several preparation methods, the paper clarifies the impact of different methods on sensor performance. Additionally, it explores the optimization of sensor performance in specific application scenarios, highlighting its potential in environmental monitoring and bioanalysis. This research provides theoretical support and practical guidance for the further development and application of heterojunction photoelectrochemical sensors based on porous materials.

【Keywords】 Porous materials; Heterojunction; Photoelectrochemical sensors; Performance optimization; Application

1 引言

在科技高速发展的今天，各领域迫切需求高灵敏度与高选择性传感器。传统传感器在复杂检测环境下的灵敏度与选择性缺陷明显，难以满足实际需求。而光电化学传感器，则依靠光激发产生的光电流或光电压变化来检测目标物质，具有响应快，灵敏度高，易微型化等优点。多孔材料高比表面积、高孔隙性，增强与目标物质作用；异质结可调节能带结构，促进载流子分离传输。二者结合构建的光电化学传感器，能够突破性能瓶颈，在环境监测，生物分析等领域发挥重要作用，其研究具有十分重要的意义。

2 传感器中的多孔材料与异质结

2.1 多孔材料的特性及优势

2.1.1 高比表面积和较丰富的孔隙结构

单位质量的材料，因此多孔材料具有很高的比表面积。例如，一些多孔碳材料的比表面积可达数千平方米每克。孔隙结构丰富，主要包括小于 2nm 的微孔，2-50nm 的介孔和大于 50nm 的大孔。这种多级孔结构相互连接，为物质的传输和吸附提供了方便的通道。多孔材料的高比表面积可以提供大量活性位点，用于光电化学传感器时，可大幅度增加与目标物质的吸附和反应。而丰富的孔隙结构则可促进溶液中的离子，分子等快速扩散到材料内部，与活性位点充分接触，以提高传感器的响应速度和检测灵敏度。

作者简介：王佳玥（2000-）女，甘肃酒泉，硕士，研究方向：纳米材料合成 光电传感器。

2.1.2 提高物质的传输与吸附性能

物质的传输和吸附性能是光电化学传感器工作过程中非常重要的一个环节。多孔材料的孔隙结构就像一个高效的物质传输网络,可以加快溶液中目标物质向传感器表面的扩散。由于孔隙的存在,目标物质不需要通过很长的扩散路线才到达活性位点,从而大大缩短了传质时间。同时,多孔材料的表面性质和孔隙结构对不同物质有一定的选择吸附能力。一些多孔材料表面具有特殊的官能团,能与目标物质产生特异性相互作用,例如氢键,静电作用等,增强对目标物质的吸附效果。这种物质传输与吸附性能的增强,使多孔材料能够对光电化学传感器中的目标物质进行更好的捕捉,提高传感器的检测性能。

2.2 异质结的原理与优势

2.2.1 能带结构调节

异质结指两种半导体材料界面组成的混合体。因为两种半导体材料的禁带宽度,电子亲和能等物理性质的不同,会在异质聚合体界面处形成特殊的能带结构。体组成异质结,采用适当的材料进行能带结构的优化调节。例如,将一种宽禁带半导体和一种窄禁带半导体组成异质结,界面处会产生能带弯曲而产生内建电场。这种内建电场可以很好的促进光生电子-空穴对的分离,使电子和空穴分别向不同的半导体材料一侧迁移,减少载流子的复合几率,提高传感器的光电转换效率。

2.2.2 促进光生载流子分离与传输

光生载流子的分离与传输效率是影响光电化学传感器性能的关键因素。异质结的内建电场可以为光生载流子的分离提供强力驱动力。当光射到异质聚合材料上形成光生电子-空穴对后,在内建电场的作用下,电子与空穴迅速向相反方向移动,分别聚集在不同的半导体材料区域。这种高效分离的过程大大减少了载流子的复合机会,使得更多的光生载流子能够参与光电化学反应,从而提高光电流的强度,提高传感器的灵敏度。同时,异质结中不同半导体材料的电学性质差异亦有利于载流子的传输。

3 多孔材料异质结光电化学传感器的构建

3.1 材料选择

3.1.1 常见多孔材料

在构建多孔材料异质结光电化学传感器时,多孔材料有多种常用材料。其中重要的材料是多孔碳材料,如活性炭、介孔碳、碳纳米管等。活性炭的微

孔结构丰富,比表面积大,能吸附多种物质,化学稳定性好。介孔碳的孔径分布均匀,在物质传输方面具有优势,可以承载其他活性物质。碳纳米管具有优异的电学性能和机械性能,它特殊的管状结构也为物质的吸附和反应提供了特殊的微环境。金属有机框架(MOFs)材料也是多孔材料的常用材料。MOFs是由金属离子或金属簇与有机配体自组装形成的具有高度有序的多孔结构,其孔径大小和孔道形状可以通过选择不同的金属离子和有机配体进行精确调控。MOFs材料的比表面积高,对气体、小分子等有较强的吸附能力,在传感器领域具有很大的应用价值。另外,无机多孔材料如多孔二氧化钛 TiO_2 、多孔氧化锌 ZnO 等也广泛应用于光电化学传感器的构成。 TiO_2 的多孔结构能增加光的吸收和散射,而且具有良好的光催化性能和化学稳定性,能够增加光生载流子的产生效率。 ZnO 则具有禁带宽,电子迁移率高等特点,多孔的形式使其与目标物质的相互作用增强。

3.1.2 与多孔材料匹配的半导体

要组成性能优良的异质复合体,就必须选用与多孔材料匹配的半导体材料。有些半导体材料对常见的多孔材料都有很好的匹配性。如 CdS , CdSe 等半导体与多孔碳材料组成的异质结,其光电性能就较好。 CdS 有适当的禁带宽度,能吸收可见光产生光生载流子,多孔碳材料能作为电子传输通道,促进载流子的传输,提高异质材料的光电转换效率。一些金属氧化物半导体,如 Cu_2O , 二氧化锡 SnO_2 等,在与 MOFs 材料匹配方面表现得比较好。 Cu_2O 是一种 p 型半导体,它与 MOFs 组成异质结后,通过界面处的电荷转移和能带匹配,能够调节光生载流子的分离和传输。另外, SnO_2 具有较好的电子迁移率,如果结合 MOFs,利用 MOFs 高比表面积和吸附性能提高对目标物质的检测灵敏度。

3.2 制备方法

3.2.1 电化学沉积法

电化学沉积法是制备多孔材料异质结晶的常用方法。它是在含金属离子或其它活性物质的电解液中,施加一定的电压或电流使金属离子或活性物质在电极表面还原沉积形成薄膜或纳米结构。用多孔材料做基底电极,在电解液中加入和基底材料匹配的半导体材料的前驱体,就制备出了多孔材料异质结。又如以多孔碳材料为基底,在含 CdS 前驱体如

镉盐和硫化物的混合溶液中,通过控制电化学沉积参数如沉积电位、沉积时间等,在多孔碳表面沉积一层均匀的 CdS 薄膜,形成多孔碳/CdS 异质结。电化学沉积法的优点是沉积过程的精确控制,对异质结的厚度、结构和组成可以进行精确调控。同时,该法可在室温下进行,设备要求较低,易于操作。但是,该方法也存在一些局限性,比如沉积过程中,容易发生杂质污染,影响异质结晶的性能等。另外一些复杂的多孔材料基底可能难以均匀沉积。

3.2.2 水热合成法

水热合成法,是指在高温高压的水溶液中进行化学反应制备材料的方法。多孔材料异质结制备是将多孔材料和半导体材料的前驱体置于高压反应釜中,加入适量的溶剂(通常为水)并加压在一定温度下和压力下进行反应。前驱体在水热条件下发生溶解,反应,结晶等过程,在多孔材料表面或内部生长出半导体材料,形成异质结晶。以制备多孔硅/硫化铅(PbS)异质结为例,可将多孔硅片和含铅盐和硫化物的溶液放入高压反应釜中,在合适的温度和压力下反应一段时间。反应过程中,多孔硅表面及多孔硅的孔隙内生长 PbS 纳米颗粒,形成多孔硅/PbS 异质体。水热合成法可以制备结晶度高、纯度好的异质结晶材料。由于反应在溶液中进行,有利于前驱体的均匀分布,获得均匀的异质结构。此外,该法还通过调节反应条件,如温度、压力、反应时间等,控制异质结的生长与性能。然而,水热合成法需要高压反应釜等特殊设备,对设备要求较高,且反应过程中存在一定的安全风险。

4 传感器性能优化

4.1 影响传感器性能的因素

4.1.1 材料结构与组成

多孔材料的结构和组成对传感器性能有很大的影响。多孔材料的孔径大小,孔隙率以及孔道连通性均影响物质的传输和吸附性能。孔径小有利于吸附小分子物质,但阻碍大分子物质的扩散;孔隙率高能提供较高活性位点,但会降低材料的机械强度。多孔材料的化学组成也会影响其与目标物质的相互作用,例如,含有特定官能团的多孔材料对具有相应亲和性的目标物质有更好的吸附及检测效果。对于异质结中的半导体材料,其禁带宽度、电子迁移率等物理性质决定了光生载流子的产生和传输效率。异质结由不同半导体材料组成,其界面处的能带结

构及电荷转移特性也不同。合理的材料结构和组成设计,能够提高传感器的性能,光生载流子的分离与传输效率,与目标物质的相互作用,从而提高传感器的灵敏度和选择性。

4.1.2 光激发条件

光激发条件是影响传感器性能的关键外部因素之一。光源的波长、强度及光照时间均对传感器的光电流响应有显著的影响。不同半导体材料的吸收光谱范围不同,光源的波长必须适合半导体材料的吸收波长,这样才能有效地激发光生载流子。例如,对于禁带宽度为 2.0eV 的半导体材料,其吸收光子的波长范围大约在 620nm 以下,需要选择此范围的光源进行激发。光源强度也影响光生载流子的数量。在一定范围内,光源强度的增加可以提高光生载流子的产生速率,从而增大光电流。但当光源强度过大时,可能会加剧光生载流子复合,降低传感器的性能。光照时间也影响传感器的性能,适当的光照时间可使光生载流子充分参与光电化学反应,得到稳定的光电流响应。但过长的光照时间还可能引起材料的光腐蚀等问题影响传感器的稳定性。因此,对光激发条件进行优化对传感器性能的提高非常重要。

4.1.3 溶液环境

溶液环境中多种因素对传感器性能影响。溶液的 pH 值能改变材料表面的电荷性质,从而影响目标物质与传感器表面的吸附和反应。譬如,在酸性溶液中,一些材料表面可带正电荷,以利于吸附带负电荷的目标物质,而在碱性溶液中,材料表面电荷性质可发生改变,从而影响吸附效果。溶液中离子强度也对传感器性能产生作用。过高的离子强度可能会导致离子在材料表面的竞争吸附,并干扰目标物质与传感器的相互作用。另外,其它如溶液中的溶解氧等也可参与光电化学反应,影响光电流的大小和稳定性。

4.2 性能优化策略

4.2.1 调控材料微观结构

调控多孔材料和异质结的微观结构,有效优化传感器性能。对于多孔材料,可以通过模板法等方法进行孔径大小和孔隙率的准确控制。例如,用聚苯乙烯微球作为模板,制备均匀孔径的介孔材料。制备时,调整聚苯乙烯微球粒径及用量,可以精确控制介孔材料的孔径大小。选择合适的孔径大小,

目标物质能更有效地扩散到多孔材料内部,与活性位点充分接触,提高传感器的响应速度和灵敏度。对异质结,可以控制制备过程中的反应温度、时间、溶液浓度等参数,从而调节异质结的晶粒尺寸、界面平整度和相结构。例如,水热合成法制备 TiO_2/CdS 异质结,降低反应温度,缩短反应时间,可以得到纳米级的 CdS 颗粒均匀的负载在 TiO_2 表面,异质结界面形成良好的电荷传输通道,降低载流子复合几率,改善传感器性能。

4.2.2 表面修饰与功能化

对多孔材料异质结进行表面修饰与功能化,可进一步改善传感器性能。通过化学接枝,物理吸附等方法在材料表面引入特定的功能基团。例如,在多孔碳材料表面接枝氨基,使之对重金属离子有更强的络合能力,当用作重金属离子检测时,能大幅提高传感器的选择性和灵敏度。除此之外,贵金属纳米颗粒如 Au 、 Ag 等也可被修饰在异质结表面。这些贵金属纳米颗粒的表面等离子体共振效应能够加强光的吸收和局域电场强度,促进光生载流子的产生,同时作为电子捕获中心,加速电子的转移,降低载流子复合率。

5 结论

本论文对基于多孔材料异质结光电化学传感器的构建进行了系统的研究。通过对其工作原理,材料特性,制备方法,性能优化及应用的深入探讨可知,多孔材料与异质结的结合,极大地提高了光电化学传感器的性能。在制备方法上,各种方法各有利弊,需要根据实际需要来选择;性能优化可从材料结构、表面修饰、检测体系等多个方面进行;在环境监测和生物分析等领域已显示出良好的应用前景。然而,目前该类传感器仍存在稳定性不足、大规模制备困难等问题。未来研究可聚焦于新型材料开发、

制备工艺优化以及与微流控技术结合等方向,推动多孔材料异质结光电化学传感器向实用化、产业化发展。

参考文献

- [1] 史妍洁,古丽契热·阿地力,田钰欣,张普皓,唐嘉康,赵李,邱玉莲,盖福鹤,高明鹤,马玉花. Z 型异质结在光电化学传感器中的研究进展[J]. 稀有金属, 2025, 49 (05): 679-694.
- [2] 刘名旺. 异质结界面调控增强光电化学纳米酶生物传感[D]. 华中师范大学, 2024.
- [3] 韦毓彬. 基于 $\text{Bi}_3\text{O}_4\text{Br}$ 光电化学传感器的构建及毒死蜱检测性能研究[D]. 昆明理工大学, 2024.
- [4] 何贤森. 基于共轭微孔聚合物光电化学传感器的构建及其在药物分析中的应用研究[D]. 河南中医药大学, 2023.
- [5] 郭斌斌. 基于多孔材料异质结光电化学传感器的构建研究[D]. 燕山大学, 2023.
- [6] 田海林. 氧化锌异质结纳米材料制备及传感器特性研究[D]. 西北工业大学[2025-06-26].
- [7] 陈红富,罗曼,沈倪明,等. 二维层状材料异质结光电探测器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光技术, 2021(1):194-204.
- [8] 张妍,化学. CdS 基异质结型光电生物传感器的构建与疾病标志物检测[D]. [2025-06-26].

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS