



石墨/4H 碳化硅纳米多孔阵列光阳极的制备及其光电催化性能研究

裴岩¹, 王蓉^{2a}, 崔灿¹, 徐凌波^{1,2b}

(1. 浙江理工大学理学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学杭州国际科创中心, a. 先进半导体研究院;

b. 浙江省宽禁带功率半导体材料与器件重点实验室, 杭州 311200)

摘要: 为提高 4H 碳化硅(4H Silicon carbide, 4H-SiC)纳米材料的光电催化性能, 采用两步阳极氧化法制备了 4H-SiC 纳米多孔阵列(Nanoporous array, NA), 并通过高温退火制备石墨/4H-SiC NA 光阳极; 通过扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X 射线光电子能谱仪、高分辨多功能光谱仪和电化学工作站对石墨/4H-SiC NA 光阳极的形貌、结构和性能进行了表征。结果表明: 阳极氧化法能够刻蚀出纳米多孔, 有效提高了 4H-SiC 的比表面积, 同时增强了电解液与材料的接触面积; 经过退火处理后, 4H-SiC NA 光阳极表面含有分散的石墨; 在光照和暗场条件下石墨的存在增强了光生载流子的分离效果, 经过优化的 4H-SiC NA 光阳极在光功率 100 mW/cm² 的模拟太阳光照条件下, 相对于可逆氢电极(Reversible hydrogen electrode, RHE), 其光电流密度在 1.23 V 达到 4.72 mA/cm², 相比 4H-SiC NA 光阳极提升了 4.14 mA/cm²。该研究为提升基于 4H-SiC 材料的光电催化制氢性能提供了一种新思路。

关键词: 4H-SiC; 纳米多孔阵列; 光阳极; 石墨; 光电催化

中图分类号: TM914.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2024)11-0801-08

引文格式: 裴岩, 王蓉, 崔灿, 等. 石墨/4H 碳化硅纳米多孔阵列光阳极的制备及其光电催化性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(6): 801-808.

Reference Format: PEI Yan, WANG Rong, CUI Can, et al. Preparation and photoelectrochemical performance of graphite/4H silicon carbide nanoporous array photoanodes[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(6): 801-808.

Preparation and photoelectrochemical performance of graphite/4H silicon carbide nanoporous array photoanodes

PEI Yan¹, WANG Rong^{2a}, CUI Can¹, XU Lingbo^{1,2b}

(1. School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2a. Advanced Semiconductor Research Institute; 2b. Key Laboratory of Wide Bandgap Power Semiconductor Materials and Devices in Zhejiang Province, Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center, Zhejiang University, Hangzhou 311200, China)

Abstract: To enhance the photoelectrochemical performance of 4H silicon carbide (4H-SiC) nanomaterials, a two-step anodic oxidation method was employed to prepare a 4H-SiC nanoporous array (NA). Subsequently, high-temperature annealing was applied for the fabrication of graphite/4H-SiC NA photoanodes. Then, the morphology, structure, and performance of graphite/4H-SiC NA photoanodes were characterized through scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray photoelectron spectrometer, high-resolution multifunctional spectroscopy and an electrochemical workstation. The results indicate that anodic oxidation can etch out nano-pores, effectively increasing the specific surface area of 4H-SiC, while enhancing the contact area between the electrolyte and the material;

收稿日期: 2024-03-04 网络出版日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U23A20569); 浙江省自然科学基金联合基金重大项目(LHZSD24E020001); 浙江省宽禁带功率半导体材料与器件重点实验室(浙江大学杭州国际科创中心先进半导体研究院)开放课题

作者简介: 裴岩(1999—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事光电催化材料方面的研究。

通信作者: 徐凌波, E-mail: xlb@zstu.edu.cn

after annealing, the surface of 4H-SiC NA photoanodes contains dispersed graphite. Under both light and dark conditions, the presence of graphite enhances the separation of photogenerated charge carriers, and the optimized 4H-SiC NA photoanodes achieve a photocurrent density of 4.72 mA/cm^2 at 1.23 V versus the reversible hydrogen electrode (RHE) under simulated solar illumination with a light power of 100 mW/cm^2 , representing an enhancement of 4.14 mA/cm^2 compared to 4H-SiC NA photoanodes. This paper provides a new approach for improving the photoelectrochemical (PEC) hydrogen production performance based on 4H-SiC materials.

Key words: 4H-SiC; nanoporous array; photocathode; graphite; photoelectrochemical

0 引言

化石燃料是地球上的重要资源之一,近几个世纪以来,化石燃料的开发和利用推动了全球工业的飞速发展,但也造成了环境恶化和能源枯竭等问题^[1]。随着资源的开采程度逐渐加深,提取化石燃料所需的成本也不断增加,这使得化石燃料变得越来越昂贵和不可持续,因此寻找清洁和可再生能源变得至关重要。氢气作为清洁和可再生能源具有十分优异的特性,在燃烧释放能量的同时副产物只有水蒸气,是一种环境友好的能源。目前,太阳能驱动的光电催化水分解制氢技术在全球能源危机的背景下备受关注,该过程借助半导体材料将太阳能转化为化学能,进而将水分子分解为氢气和氧气。自1972年^[2]日本学者在光电催化分解水方面的开创性工作以来,科学家们在光电催化领域已经进行了众多探索,各种半导体材料,如 TiO_2 ^[3]、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ^[4]、 ZnS ^[5]、 BiVO_4 ^[6]和 SrTiO_3 ^[7]等,已被广泛开发用于光催化水分解。理想的用于水分解的半导体应具有大于 1.23 eV 的带隙和适当的氧化还原电位^[7]。制备具有优异的光吸收能力、高载流子迁移率、高稳定性和低载流子复合速率的半导体光电极对于高性能的光电催化水分解至关重要^[8]。在半导体家族中, SiC 具有高载流子迁移率、高稳定性和优异的抗辐射等特性,适合应用于高温、高腐蚀性和电子辐射环境中,因此在众多光电极中成为有竞争力的候选者^[9]。

Lauermann 等^[10]证明 6H-SiC 能够被应用于光电催化,制得的 6H-SiC 光阳极在光功率 400 mW/cm^2 的模拟阳光照射下具有 0 V vs RHE 的初始电位, 1.23 V vs RHE 电位下的光电流密度达到了 0.17 mA/cm^2 。虽然 SiC 材料已被证实能够应用于光电催化反应,但光电极的高光电催化性能通常受到内部的高光生载流子复合率的限制^[11]。在众多光电极修饰策略中,异质结构能够有效降低载流子的复合率^[12],因此研究人员越来越倾向于通

过设计异质结构来改善 SiC 光阳极的光电催化性能。Jian 等^[13]将 3C-SiC 和 p 型 NiO 纳米团簇相结合形成异质结构,异质结促进了光生载流子的分离,制得的光电极在光功率 100 mW/cm^2 的模拟阳光照射下具有 0.20 V vs RHE 初始电位,并在 0.55 V vs RHE 电位下获得 1.01 mA/cm^2 的光电流密度。此后,该团队^[14]将 3C-SiC 的块状结构改变为纳米多孔 3C-SiC 光阳极并与 Ni: FeOOH 共催化剂耦合,在光功率 100 mW/cm^2 的模拟阳光照射下实现了 1.23 V vs RHE 处 2.30 mA/cm^2 的光电流密度。此外,4H-SiC NA 光阳极的高光电催化活性已经得到证明^[15]。尽管关于 SiC 异质结构修饰策略的研究已经取得了重大进展,但寻找其他耦合材料仍十分必要。石墨烯(Graphene)是碳的同素异形体,碳原子以 sp^2 杂化键合形成单层六边形蜂窝晶格,利用石墨烯这种晶体结构可以构建富勒烯(C_{60})、石墨烯量子点、碳纳米管、纳米带、多壁碳纳米管和纳米角等^[11]。堆叠在一起的石墨烯层形成石墨,层间通过范德华力保持在一起,晶面间距约为 0.34 nm 。与其他材料相比,石墨烯具有优异的电学性能,通常用作光催化的载体材料以及改性基底材料^[16],可以有效提高催化活性,目前石墨烯和石墨可以通过硅碳化物的热分解来制备^[17]。

本文选择 4H-SiC NA 光阳极进行研究,采用不同的真空退火条件制得石墨含量不同的石墨/4H-SiC NA 光阳极,并通过各种表征手段系统分析石墨/4H-SiC 异质结构对光阳极光电催化性能的影响。为采用石墨/4H-SiC 异质结构提升光电催化性能奠定理论依据,同时也为微纳结构 4H-SiC 的应用提供了参考实例。

1 实验部分

1.1 实验材料与试剂

暴露面为(0001)的 N 掺杂 4H-SiC 单晶片购自杭州乾晶半导体有限公司,40.0% 氢氟酸(HF)、30.0% 过氧化氢(H_2O_2)、99.7% 乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、

99.5% 丙酮 ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) 和 99.0% 无水硫酸钠 (Na_2SO_4) 均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 石墨/4H-SiC NA 光阳极的制备

纳米多孔阵列采用阳极氧化法制备, 具体方法如下: 将清洗后的 4H-SiC 切成 $1.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ (长 \times 宽) 的小片, 将小片依次用丙酮、乙醇和去离子水超声波清洗 10 min, 去除样品表面的污渍; 将清洗后的小片在体积比为 1:1 的氢氟酸和乙醇的混合溶液中浸泡 2 min 以去除样品表面的氧化物; 将清洗好的小片放置于氢氟酸、乙醇和双氧水的体积比为 3:6:1 的刻蚀液中, 4H-SiC 小片为阳极, 石墨电极为阴极, 对 4H-SiC C 面进行刻蚀。

用紫外光辅助的 3 V 恒定电压阳极氧化 10 min 以去除盖层并刻蚀出纳米多孔, 通过 12 V 脉冲电压 ($T_{\text{on}}=0.4 \text{ s}$, $T_{\text{off}}=0.4 \text{ s}$) 阳极氧化 4 min 以增加多孔的深度; 将得到的 4H-SiC NA 光阳极放于管式炉中真空退火以制备石墨/4H-SiC 异质结构, 退火温度分别设置为 700、800、900 $^{\circ}\text{C}$ 和 1000 $^{\circ}\text{C}$, 目标温度的保持时间定为 10 min, 制得的样品分别命名为 S700-10、S800-10、S900-10 和 S1000-10; 退火温度设置为 1000 $^{\circ}\text{C}$, 退火时间分别设置为 30 min 和 50 min, 将制备的样品分别命名为 S1000-30 和 S1000-50。

1.3 测试与表征

使用扫描电子显微镜 (Sigma300, Zeiss) 对形貌进行表征 (SEM); 使用透射电子显微镜 (Talos F200X S/TEM, Thermo Fisher Scientific) 对形貌和结构进行表征 (TEM); 使用高分辨多功能光谱仪 (LabRAM Odyssey, Horiba) 对多孔结构进行拉曼光谱测试 (Raman), 使用 X 射线光电子能谱仪 (K-Alpha, Thermo Fisher Scientific) 对表面 C 元素的化学环境进行分析 (XPS)。使用电化学工作站 (CS2350 H, Corrtest) 和光功率 $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的氙灯电源系统 (CEL-HXUV300-T3, CEAULIGHT) 对光电催化性能进行测试, 包括: 在光照和电压范围 0~1.5 V vs RHE 条件下进行线性扫描伏安 (LSV) 测试, 电压扫描速率为 25 mV/s; 在 0~1.23 V vs RHE 电压范围内进行光电流和暗电流测试, 电压扫描速率为 25 mV/s; 在开关灯照明和 1.23 V vs RHE 电压条件下进行瞬态光电流响应曲线测试, 开关灯时间间隔为 20 s; 在光照和 0.5 V vs RHE 电压条件下进行电化学阻抗谱测试, 测试频率范围为 $10^6 \sim 1 \text{ Hz}$ 。光电催化性能测试采用的三电极体系结构示意图如图 1 所示。

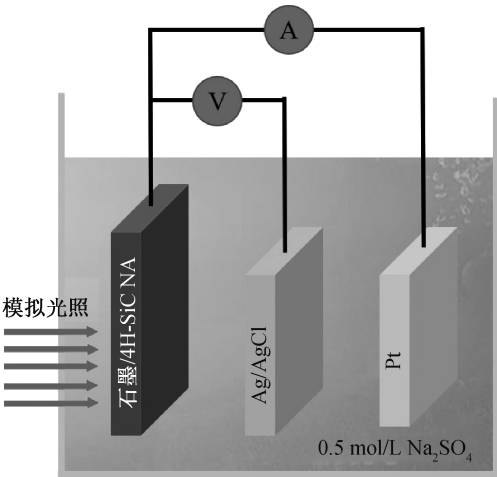


图 1 光电催化性能测试所采用的三电极体系结构示意图

2 结果与讨论

2.1 石墨/4H-SiC NA 光阳极结构表征与分析

图 2(a) 为经过两步阳极氧化法刻蚀样品 S1000-50 的表面和截面 SEM 图像。4H-SiC NA 光阳极表面均匀分布着大规模且排列良好的纳米多孔, 纳米多孔的随机均匀分布是由于阳极氧化过程中电场在表面的随机分布, 纳米多孔直径则取决于刻蚀时间 (见图 2(a)), 4H-SiC NA 光阳极的粗糙表面能够有效增加光阳极的比表面积, 从而提高光阳极对光的利用率。图 2(b) 为 S1000-50 的截面 SEM 图像, 从图中能够看出: 纳米多孔阵列的深度约为 14 μm , 高长径比的特性能够增加电解质与材料的接触面积从而增加催化反应活性位点^[18]; 垂直排列的纳米多孔阵列有利于电解质溶液输送到纳米多孔阵列底部; 刻蚀区域和非刻蚀区域展现出平滑的界面连接, 说明阳极氧化法是一种较温和的刻蚀方法。

为了直观表征纳米多孔的表面参数, 分别选取 S1000-50 上连续的 100 个多孔和孔壁, 使用 Nano Measurer 软件对孔径和孔壁厚度进行统计, 结果如图 3 所示。由图 3 可以观察到: 多孔直径的主要范围在 15~50 nm, 平均孔径为 32.31 nm; 孔壁厚度的主要范围在 10~50 nm, 平均孔壁厚度为 27.74 nm。

为了确认纳米多孔阵列在真空退火后纳米尺度的变化, 分别对 S1000-50 表面和截面进行 TEM 表征。首先采用聚焦离子束技术 (FIB) 得到截面样品并进行 TEM 测试, 结果如图 4(a) 所示, 从图 4(a) 中可以看出: 4H-SiC 单晶表面覆盖着一层厚度在 3~5 nm 的非晶层, 晶格条纹呈无序状, 这是阳极氧化刻蚀造成的; 在非晶层以下, 可以观察到长程有序

的、晶格间距为 0.25 nm 的晶格条纹,这是典型单晶 4H-SiC 的晶面间距。使用金刚刀在样品 S1000-50 表面刮取一定量粉末,将粉末置于乙醇溶液中并超声波分散 1 h,得到表面样品并进行 TEM 测试,结果如图 4(b)所示。图 4(b)显示:经过真空退火的纳米多孔结构表面大部分区域呈现出无序的晶格条

纹,仍有小部分区域观察到短程有序,长程无序的晶格条纹,纳米尺度晶格条纹的间距约为 0.34 nm,与文献[19]报道的石墨面间距一致。TEM 测试结果表明:SiC 分子中的 Si 原子在真空退火条件下升华,残留的 C 原子在高温下排列重组形成石墨。

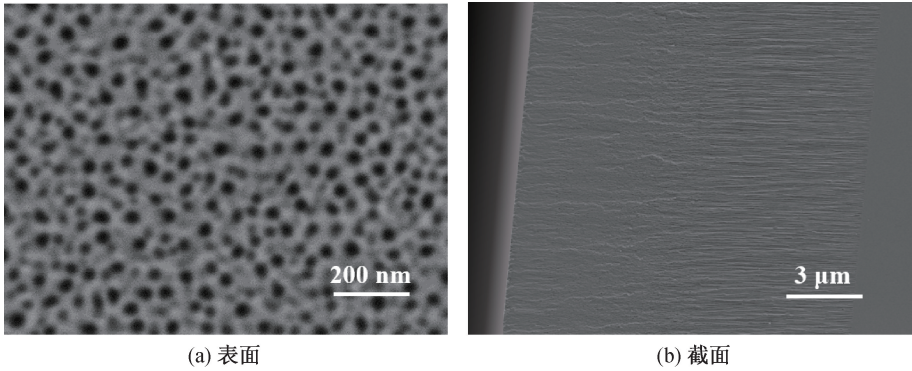


图 2 4H-SiC NA 光阳极的 SEM 图

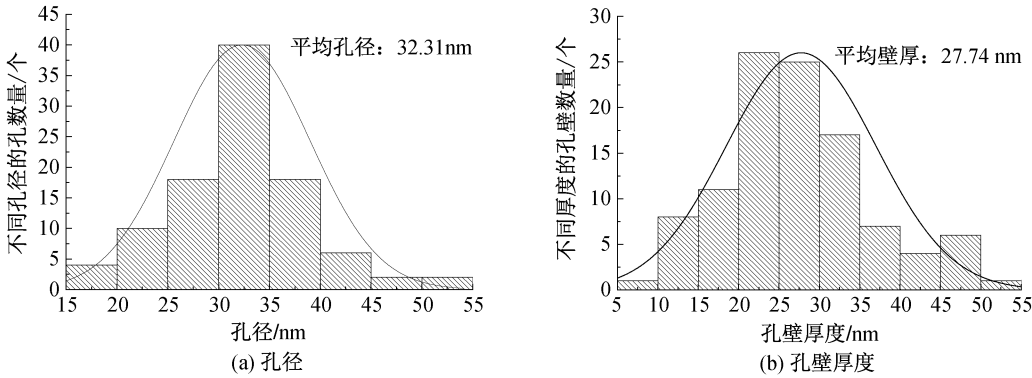


图 3 S1000-50 的孔径和孔壁厚度统计

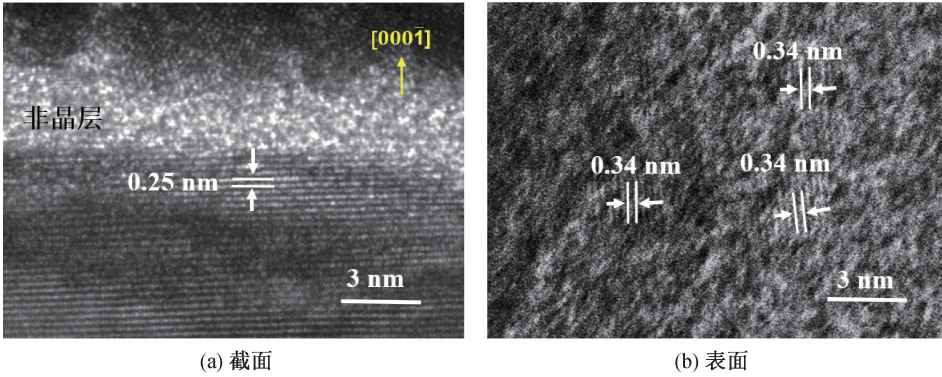


图 4 S1000-50 的 TEM 图

为了进一步验证真空退火成功在 4H-SiC NA 表面生成了石墨,对真空退火前后的纳米多孔阵列进行 Raman 测试并对 S700-10、S1000-10 和 S1000-50 进行 XPS 能谱测试,结果如图 5 所示。图 5(a)为 4H-SiC NA 光阳极和 S1000-50 的拉曼光谱,由图 5(a)可知:真空退火前后的纳米多孔阵列均能够观察到 4H-SiC 位于 202 cm^{-1} 、 776 cm^{-1} 和 978 cm^{-1} 处

的典型特征峰^[20],说明样品的主要成分仍为 4H-SiC;在 S1000-50 的拉曼光谱可以观察到 1356 cm^{-1} 附近的 D 峰, 1597 cm^{-1} 附近的 G 峰以及 2706 cm^{-1} 附近的 2D 峰,这些特征峰均为石墨的特征峰,相对于剥离的石墨烯和石墨的谱线,G 和 2D 谱线明显变宽和蓝移,这是由于 4H-SiC 真空退火产生的石墨存在大量缺陷和压缩应变^[21]。图 5

(b)–(d)为样品 S700-10、S1000-10 和 S1000-50 的 C 1s 核能级 XPS 光谱,所有 C 1s XPS 能谱均经过 Lorentz-Gaussian 函数背景校正,并拟合为 3 个峰。从图 5(b)可以看出:样品的 C 1s 能级峰均位于 282.5 eV 和 286.5 eV 之间,拟合得到的 3 个峰分别对应 SiC、石墨(G)和碳缓冲层(B)的特征峰,最高强度峰以 SiC 特征峰为基准,结合能为 283.7 eV^[20];石墨中碳的结合能为 284.7 eV^[22];石

墨与 4H-SiC 之间的缓冲层结构类似于石墨,结合能为 285.6 eV^[23];对不同特征峰的含量进行统计,结果显示 S700-10、S1000-10 和 S1000-50 中石墨特征信号的相对含量分别为 9.77%、11.88% 和 12.34%。综上所述:真空退火在样品表面生成了石墨,并且石墨的含量与退火温度、退火时间正相关,在所有真空退火样品中,S1000-50 中的石墨含量最高。

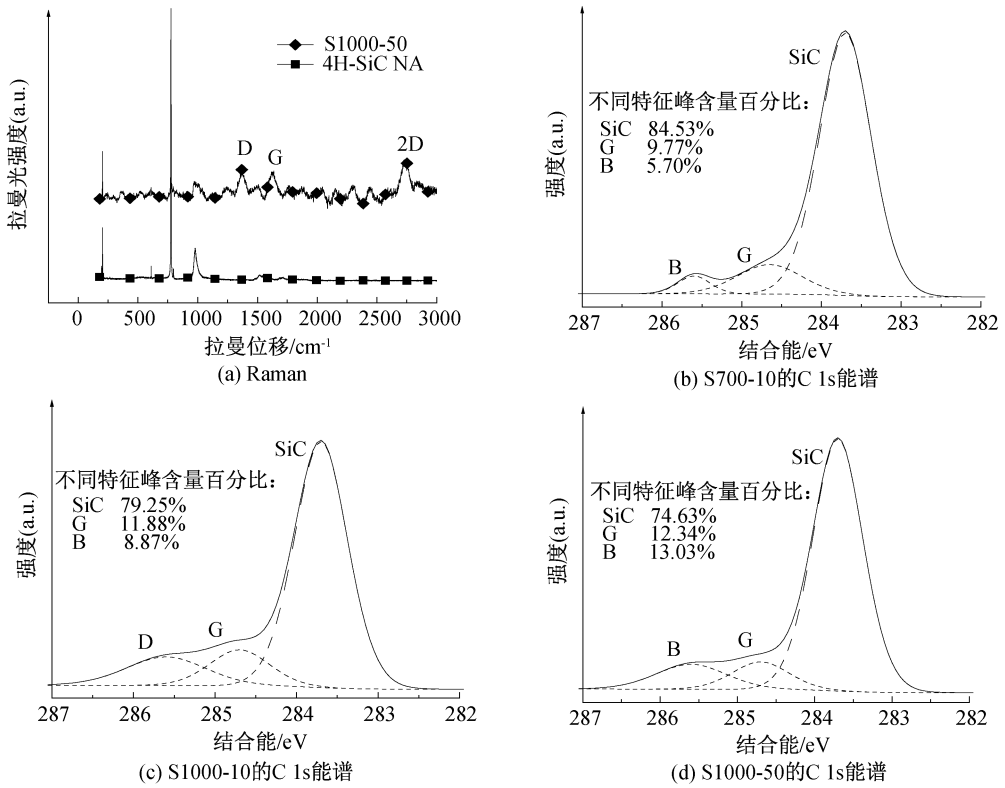


图 5 4H-SiC NA 光阳极真空退火前后的 Raman 和不同样品的 XPS

2.2 石墨/4H-SiC NA 光阳极光电催化性能测试与分析

图 6(a)为模拟光照(光功率 100 mW/cm²)下 4H-SiC NA 光阳极、S700-10、S800-10、S900-10 和 S1000-10 的 LSV 曲线,从图 6(a)中可以看出: S1000-10 在 0~1.5 V vs RHE 电压范围内光电流密度随着电压变大而增加,经过退火的样品在电压在 0.4~1.5 V vs RHE 的电压范围内光电流密度开始增加,优于 4H-SiC NA 光阳极在 0.6~1.5 V vs RHE 的范围内电流密度开始增加。图 6(c)为 S1000-10、S1000-30 和 S1000-50 的 LSV 曲线,从图中可以看出: S1000-10、S1000-30 和 S1000-50 的光电流密度在整个电位窗口内不断增加; S1000-50 的样品具有最高的光电流密度。图 6(b)和图 6(d)为模拟光照(光功率 100 mW/cm²)下不同样品的 EIS 图谱,图 6(b)和图 6(d)中的插图为模拟等效电路

图,其中 R_s 为电解池的溶液电阻,对应于拟合曲线的起始值; R_{ct} 为电荷的界面传输电阻,代表载流子在界面传输的难易程度,对应拟合曲线的圆弧直径, R_s 和 R_{ct} 具体数值如表 1 所示。结合图 6 和表 1 可以得知: S1000-50 具有最小的弧半径,即 2193 Ω 的最小电荷界面传输电阻,进一步证明了 LSV 曲线所表示的规律。以上结果表明石墨的存在能够降低载流子界面传输电阻,显著提升 4H-SiC NA 光阳极的光电催化性能, S1000-50 具有最强的光电流密度,在本文所采用的实验方案中,理想的实验条件为 1000 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火 50 min。

为了分析 S1000-50 和 4H-SiC NA 光阳极电流密度在暗态和光照条件下的变化规律,进一步对其在 -0.20~1.23 V vs RHE 范围内进行 LSV 测试,结果如图 6(a)所示。在光照条件下,石墨/4H-SiC NA 光阳极的光电流在电位达到 -0.10 V vs RHE

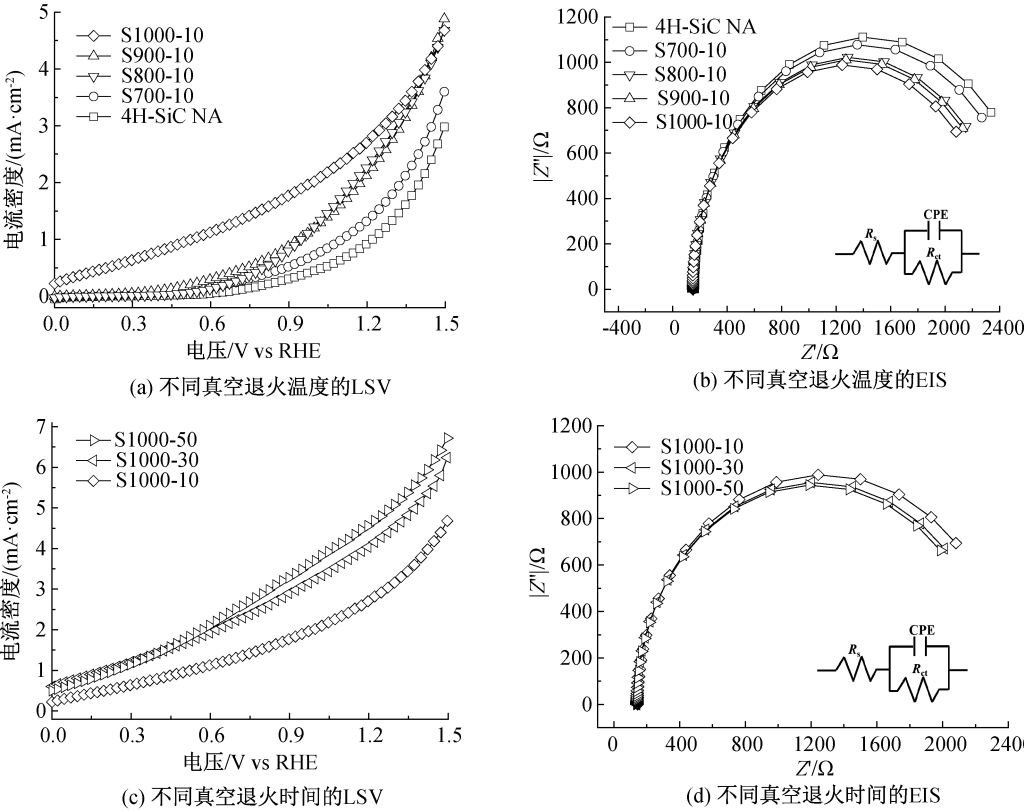


图 6 不同实验条件下 4H-SiC NA 光阳极的 LSV 和 EIS

表 1 不同真空退火条件样品的电化学阻抗参数

样品名称	R_s/Ω	R_{ct}/Ω
4H-SiC NA	133	2613
S700-10	142	2558
S800-10	137	2421
S900-10	146	2393
S1000-10	145	2335
S1000-30	136	2272
S1000-50	121	2193

时开始迅速增加,在 1.23 V vs RHE 获得了 4.72 mA/cm² 的高光电流密度,远超同等电位下 4H-SiC NA 光阳极的光电流密度(0.58 mA/cm²); 石墨/4H-SiC NA 光阳极的暗电流密度在整个电压范围内略高于 4H-SiC NA 光阳极,表明石墨的存在促进了电荷传输,进一步证实了 EIS 的表征结果。为探究 S1000-50 的光响应速度和稳定性,在 1.23 V vs RHE 对 S1000-50 进行开关照明测试,得到的瞬态光电流响应曲线如图 7(b)所示。图 7(b)显示:施加光照后样品的光电流密度迅速增加,说明 4H-SiC NA 光阳极具有快速的光响应速率;经过 600 s 开关照明后,光电流密度的稳定峰值减少了 18%,表明光阳极具有一定的稳定性。

4H-SiC 具有大于 1.23 eV 的带隙和适当的氧化还原电位,当多孔阵列受到太阳光辐照时能够产

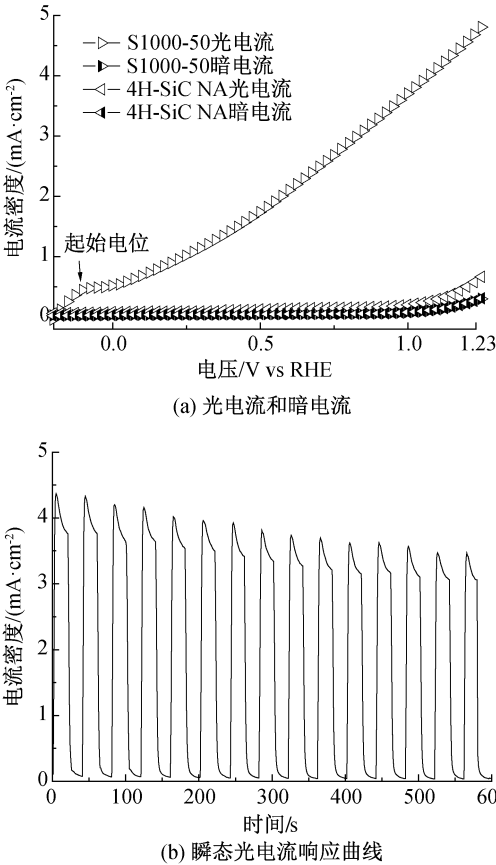


图 7 S1000-50 和 4H-SiC NA 光阳极的光、暗电流和 S1000-50 的瞬态光电流响应曲线

生光生电子和空穴,光生电子和空穴在电压作用下分别被输送到阳极和阴极参与氧化还原反应,此过程中载流子的高复合率是高性能光电催化光阳极的阻碍之一。图 8 为石墨/4H-SiC NA 光阳极光生电子空穴和分离示意图。由图 8 可知:石墨/4H-SiC NA 光阳极在光子辐射下产生光生载流子,随后光生载流子传输到石墨组分中并被快速传输到光阳极表面参与催化反应;石墨的窄禁带宽度使其与 4H-SiC 的异质结构抑制了光生载流子的复合,降低了光阳极和电解质溶液界面处的接触电阻,从而提高了 4H-SiC NA 光阳极的光电催化性能。

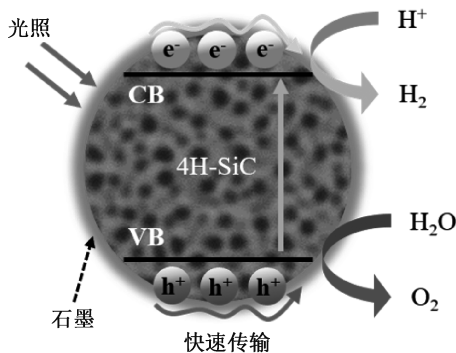


图 8 石墨/4H-SiC 纳米多孔阵列
光生电子和空穴分离示意图

3 结 论

本文采用阳极氧化法制备了 4H-SiC NA,并在此基础上通过高温退火在 4H-SiC NA 光阳极表面原位生长石墨,并对石墨/4H-SiC NA 光阳极的形貌、结构和光电性能进行表征和分析,主要得出以下结论:

a) 4H-SiC NA 表面形貌表现为纳米多孔和纳米多孔阵列,纳米多孔均匀分布于表面;纳米多孔阵列平行排列并且高度定向,具有较高的长径比。这些特性提升了光阳极的光利用率,能够增加光阳极与电解液之间的光电催化反应位点。

b) 对 4H-SiC 进行真空退火是一种生长石墨的有效方法,且石墨含量与退火温度、退火时间正相关。石墨分散在 4H-SiC NA 表面并与之形成了多个小异质结,异质结构显著降低了光阳极与电解质溶液间的界面传输电阻,抑制了光生载流子的复合。

c) 石墨的存在显著提升了 4H-SiC NA 的光电性能,石墨/4H-SiC NA 光阳极在 1.23 V vs RHE 电压下的电流密度高达 4.72 mA/cm²,相较于对照组提升了 4.14 mA/cm²。

石墨作为高导电性的修饰材料附着于 4H-SiC

纳米多孔表面,可以提升光生载流子的分离和输运效果,从而改善 4H-SiC NA 光阳极在光电催化领域的光生载流子高复合率问题,为提升微纳结构 SiC 器件的光电性能提供了新思路。

参考文献:

- [1] Dong Y, Zhai X, Wu Y, et al. Construction of n-type homogeneous to improve interfacial carrier transfer for enhanced photoelectrocatalytic hydrolysis[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 658: 258-266.
- [2] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238 (5358): 37-38.
- [3] Cao Z, Feng Y, Zhang B, et al. Regulation of bubble behavior on a TiO₂ photoelectrode surface during photoelectrocatalytic water splitting[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2022, 126 (30): 12480-12491.
- [4] Liu S, Zheng L, Yu P, et al. Novel composites of α -Fe₂O₃ tetrakaidecahedron and graphene oxide as an effective photoelectrode with enhanced photocurrent performances [J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26 (19): 3331-3339.
- [5] Xu X, Li S, Chen J, et al. Design principles and material engineering of ZnS for optoelectronic devices and catalysis[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28 (36): 1802029.
- [6] Singla S, Devi P, Basu S. Revolutionizing the role of solar light responsive BiVO₄/BiOBr heterojunction photocatalyst for the photocatalytic deterioration of tetracycline and photoelectrocatalytic water splitting[J]. Materials, 2023, 16 (16): 5561-5581.
- [7] Huerta A, Usiobo O, Audinot J, et al. Low temperature open-air plasma deposition of SrTiO₃ films for solar energy harvesting: Impact of precursors on the properties and performances [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 14 (6): 8527-8536.
- [8] 周林林, 杨涛, 王恩会, 等. 碳化硅纳米线阵列基一体化光电阳极用于高效裂解水制氢[J]. 工程科学学报, 2023, 45 (7): 1149-1155.
- [9] Giannazzo F, Panasci S, Schilirò E, et al. Integration of graphene and MoS₂ on silicon carbide: Materials science challenges and novel devices[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2024, 174: 108220.
- [10] Lauermaun I, Memming R, Meissner D. Electrochemical properties of silicon carbide [J]. Journal of The Electrochemical Society, 1997, 144 (1): 73-80.
- [11] Wei Z, Hou Y, Yang Y, et al. The progress on graphene-

- based catalysis[J]. *Current Organic Chemistry*, 2016, 20 (20): 2055-2082.
- [12] 李亚峰, 王志博, 伍健伯. 光电催化及其耦合技术的研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43 (10): 30-35.
- [13] Jian J, Shi Y, Ekeroth S, et al. A nanostructured NiO/cubic SiC p-n heterojunction photoanode for enhanced solar water splitting[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7 (9): 4721-4728.
- [14] Jian J, Jokubavicius V, Syvajarvi M, et al. Nanoporous cubic silicon carbide photoanodes for enhanced solar water splitting[J]. *ACS Nano*, 2021, 15 (3): 5502-5512.
- [15] Xu S, Jiang F, Gao F, et al. Single-crystal integrated photoanodes based on 4H-SiC nanohole arrays for boosting photoelectrochemical water splitting activity [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12 (18): 20469-20478.
- [16] Li D, Yang P. Structure, electronic and optical properties of B single- and double-doped graphene[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2023, 290: 116336.
- [17] Kesavan G, Sorescu D, Zeng Z, et al. Optimizing dicyandiamide pretreatment conditions for enhanced structure and electronic properties of polymeric graphitic carbon nitride [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11 (42): 14865-14875.
- [18] Niu P, Zhang L, Liu G, et al. Graphene-like carbon nitride nanosheets for improved photocatalytic activities [J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22 (22): 4763-4770.
- [19] Tang Y, Wang X, Chen J, et al. PVP-assisted synthesis of g-C₃N₄-derived N-doped graphene with tunable interplanar spacing as high-performance lithium/sodium ions battery anodes[J]. *Carbon*, 2021, 174: 98-109.
- [20] Davydov V, Usachov D, Lebedev S, et al. Study of the crystal and electronic structure of graphene films grown on 6H-SiC (0001)[J]. *Semiconductors*, 2017, 51 (8): 1072-1080.
- [21] Yu K, Zhao W, Wu X, et al. In situ atomic-scale observation of monolayer graphene growth from SiC [J]. *Nano Research*, 2018, 11 (5): 2809-2820.
- [22] Fu W, Zhang Y, Zhang X, et al. Progress in promising semiconductor materials for efficient photoelectrocatalytic hydrogen production[J]. *Molecules*, 2024, 29 (2): 289.
- [23] Chaika A, Aristov V, Molodtsova O. Graphene on cubic-SiC[J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 89: 1-30.

(责任编辑:廖乾生)