

硅基太阳能电池 I - V 曲线 S 形异常的多尺度解析与教学策略优化

谢子昂^{1,4} AHMED Tanvir⁵ 陈 森² 张师平¹ 闫松涛³ 王玉荣³ 裴艺丽²
李 莉² YEN Sros⁶ 吴 平¹

(¹ 北京科技大学数理学院, 北京 100083; ² 北京科技大学自然科学基础实验中心, 北京 100083;
³ 北京科技大学国家材料服役安全中心, 北京 102206; ⁴ 北京科技大学顺德创新学院, 广东 佛山 528399;
⁵ 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; ⁶ 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要 本文聚焦于硅基太阳能电池 I - V 曲线测量中常见的 S 形异常现象, 选取晶体硅(c-Si)、多晶硅(mc-Si)与非晶硅(a-Si:H)三种典型材料体系为研究对象, 系统分析其在不同结构与界面条件下出现 I - V 曲线 S 形异常的微观物理机制。通过引入界面能带工程、界面态诱导势垒、电荷积聚与载流子复合行为等理论模型, 揭示了界面能带未对齐、Fermi 能级钉扎及高密度缺陷态所导致的电荷输运障碍是该异常的本质成因。我们进一步结合温度依赖性分析, 明确了低温条件下热发射能力减弱对 S 形异常增强的关键影响。教学实践方面, 本文提出将 S 形异常引入大学物理实验课程, 构建融合实验测量、理论建模与数值仿真的探究式教学模式, 培养学生从现象出发反溯基础物理知识, 深入研究其微观物理机制, 并利用仿真工具进行性能优化的科研能力。通过多种材料体系和实验条件的比较分析, 学生能够形成从器件结构出发, 集合材料特性、界面物理方面的知识研究宏观输出响应。该项教学措施不仅深化了对光伏器件非理想特性的物理认知, 也为大学物理实验教学改革提供了可操作性强的理论框架与实践范式。

关键词 太阳能电池; I - V 曲线 S 形异常; 界面势垒; 缺陷态; 实验教学改革

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.07.23.01

MULTISCALE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF TEACHING STRATEGIES FOR THE S-KINK IN THE I - V CURVE OF SILICON-BASED SOLAR CELLS

XIE Ziang^{1,4} AHMED Tanvir⁵ CHEN Sen² ZHANG Shiping¹ YAN Songtao³ WANG Yurong³
PEI Yili² LI Li² YEN Sros⁶ WU Ping¹

(¹ School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

² Basic Experimental Center for Natural Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

³ National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 102206;

⁴ Shunde Innovation School, University of Science and Technology Beijing, Foshan, Guangdong 528399;

⁵ School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

⁶ School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract We focus on the commonly observed S-shaped anomaly, or S-kink, in the I - V char-

收稿日期: 2025-07-23

基金项目: 北京科技大学本科教育教学改革重点项目——光学实验课程科技融合与创新应用留学生课教学改革(JG2023M34); 北京科技大学全英文教学课程建设项目——工科物理实验(KC2023QYW09); 北京科技大学青年教师学科交叉研究项目——多重环境因素下太阳能电池退化行为与防护策略研究(FRF-IDRY-24-025); 广东省基础与应用基础研究基金——特种功能高分子掺杂的全钙钛矿叠层电池研究(2024A1515110088); 北京科技大学 2025 年度科技与文明中外人文交流研究开放课题资助项目——基于光学实验教学的中外学生协同育人与科技文化传播路径探索(2025KFTS001)。

通信作者: 吴平, pingwu@sas.ustb.edu.cn。

引文格式: 谢子昂, Tanvir Ahmed, 陈森, 等. 硅基太阳能电池 I - V 曲线 S 形异常的多尺度解析与教学策略优化[J]. 物理与工程, 2026, 36(1): 225-236.

Cite this article: XIE Z A, AHMED T, CHEN S, et al. Multiscale analysis and optimization of teaching strategies for the S-kink in the I - V curve of silicon-based solar cells[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(1): 225-236. (in Chinese)

acteristics of silicon-based solar cells. Three representative material silicon-based photovoltaic systems were studied, including: crystalline silicon (c-Si), multi-crystalline silicon (mc-Si), and amorphous silicon (a-Si:H), to systematically analyze the microscopic physical mechanisms of the S-kink under different device structures and interface conditions. By introducing concepts such as energy band engineering at interfaces, interface-state-induced potential barriers, charge accumulation, and carrier recombination behavior, the study reveals that band misalignment, Fermi level pinning, and high-density defect states are the fundamental causes of carrier transport barriers leading to S-kink. In terms of teaching practice, this work proposes integrating the S-kink phenomenon into the college physics experiment curricula, and establishes an inquiry-based instructional model that combines experimental measurement, theoretical modeling, and numerical simulation. The methodology aims to cultivate the students' ability to infer microscopic mechanisms from macroscopic observations, build quantitative models, and utilize simulation tools for parameter extraction and device performance optimization. Through cross-comparison among different material systems and experimental conditions, the students can develop a comprehensive understanding including device structure, material properties, interface physics, and electrical output response. The study deepens the physical insight into non-ideal behaviors in the photovoltaic devices and offers a practical and pedagogical framework for the reform of advanced college physics experiment courses.

Key words solar cells; S-kink in the I - V curve; interface barrier; defect states; experimental teaching reform

太阳能电池实验作为大学物理实验课程中的核心模块之一,紧密结合了当前新能源技术发展趋势,并为学生提供了将经典物理原理应用于现代工程问题的综合性研究平台^[1,2]。该实验中,学生通过对光照下电池电流-电压(I - V)特性进行测量与分析,掌握太阳能电池的工作原理、器件能带结构、电荷输运机制以及 I - V 参数提取方法等知识^[3-5]。实验还能促使学生在真实数据处理中锻炼实验设计能力、理论建模能力和数据分析能力,逐步从“物理规律的验证者”成长为“工程问题的研究者”^[1,6]。

教学中,我们发现学生在完成 I - V 特性测量任务时,有时遇到一些电池器件出现非理想电流响应。如图 1(a)所示, I - V 曲线在低电压区域出现明显的弯曲拐点,呈现出类似字母“S”的形状,称为 S 形异常(S-shape kink)。电池的正常与 S 形异常 I - V 曲线对比示于图 1(b),可见 S 形异常往往伴随填充因子(FF)和光电转换效率(PCE)的显著下降,这表明器件内部存在额外电荷输运障碍,违背了简单理想二极管模型的物理预期^[4,5]。对该异常现象的深入探究不仅具有重要

的教学价值,也为学生提供了宝贵的科研训练机会。通过研究 S 形异常的产生机理,学生可以进一步理解材料能带结构不匹配、界面缺陷态分布、载流子复合与界面势垒等微观机制在器件宏观 I - V 特性中的具体体现。在这一过程中,他们能够系统运用大学物理、半导体物理和材料科学等跨学科知识,构建理论模型、验证假设,并借助仿真手段进行参数反演和机理分析,显著提升其问题发现、数据建模与科研表达等综合科研素养。

本文从教学研究视角出发,围绕课堂上实际使用的晶体硅(c-Si)、多晶硅(mc-Si)和氢化非晶硅(a-Si:H)等三类 Si 基太阳能电池中 I - V 曲线 S 形异常的产生机理和影响因素开展研讨,并提出引导学生深入分析该现象的方法和建议。文章同时从教学实践出发,探讨如何将该异常现象有效引入实验课程设计,构建融合实验测量、理论推导与仿真模拟的反溯分析法与教学模式^[6,7]。这一方法可帮助学生建立从实验现象出发、深入物理本质的系统分析能力,为大学物理实验课程的教学改革提供理论支撑与实践范式。

1 I - V 曲线 S 形异常的物理机制分析

出现 I - V 曲线 S 形异常的根源之一,在于太阳能电池内部出现较高电荷输运势垒^[4,5]。异质结结构中,若不同材料导带、价带不连续,则可能在界面形成势垒。光生载流子穿越该界面时,若其热能或漂移驱动力不足,就会在势垒前形成积聚,导致电流停滞。以 a-Si:H/c-Si 异质结为例,其能带结构示于图 1(c)。a-Si:H 的 E_g 较大, Fermi 能级位置与 c-Si 不同,若界面处形成较大导带对准差($\Delta E_c \sim 0.5\text{eV}$),对于多数载流子来说就相当于增加了额外势垒。该势垒将削弱 p-n 结原有内建电场在界面附近的强度,并降低载流子的迁移和收集效率。外加电压较低时,载流子难以克服

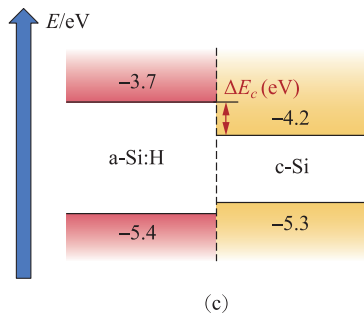
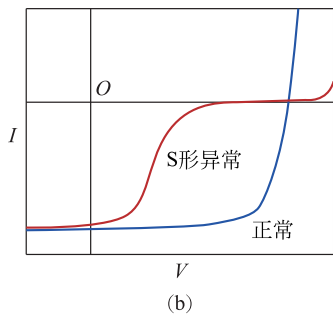
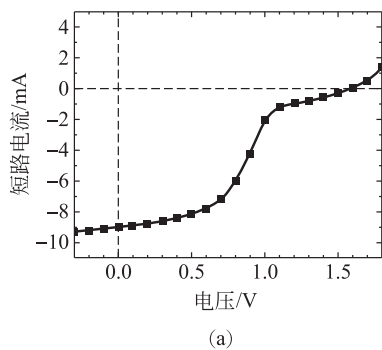


图1 a-Si:H 电池 S 形异常现象与异质结能带结构分析
(a) 典型 a-Si:H 电池 S 形异常 I - V 曲线结果; (b) 太阳能电池的正常与 S 形异常 I - V 曲线示意图; (c) a-Si:H/c-Si 异质结能带结构示意图

该势垒而累积在界面。过量的光生载流子以复合方式消耗,使得界面及其邻近耗尽区中的复合速率陡增,进一步降低光生电流,宏观上就表现为 S 形异常^[8]。当外加偏压升高,使载流子具有足够能量跨越势垒后,电流才恢复增长。S 形异常通常发生在光照条件下,因为光生载流子的存在和累积是其产生前提。暗态下的 I - V 曲线主要体现为具有额外的串联或并联电阻,而非明显的 S 形异常。

过高界面缺陷态亦可导致 S 形异常。悬挂键、杂质等界面缺陷可俘获载流子,形成 Fermi 能级钉扎和额外电荷积聚。界面缺陷态密度过高时,界面出现空间电荷积累,产生与 p-n 结内建场方向相反的电场,从而部分抵消 p-n 结内建电势,造成光生载流子聚集并复合,形成 S 形异常。除增强复合外,界面势垒还可能导致载流子以隧穿等非常规途径流动,或使部分区域形成局部电势反转形成漏电流,从而扭曲 I - V 曲线形状^[9-11]。改善加工工艺、减少界面缺陷态后, Fermi 能级钉扎效应减弱, S 形异常现象随之缓解。

温度对 I - V 曲线 S 形异常有显著影响。一般而言,降低温度会加剧 S 形异常,而升高温度可以减轻或消除该现象^[8]。其原因在于低温下半导体的载流子热发射能力和迁移率降低,因而更难以逾越界面势垒。因此,在实验中若在不同温度下测量,可更加直观地演示 S 形异常的温度敏感性。

2 c-Si、mc-Si 与 a-Si:H 电池中 S 形曲线的异同

不同材料体系的太阳能电池结构和物理特性各异,出现 S 形异常的具体原因和表现形式也有所不同。为深入揭示光伏材料差异对器件性能的影响,我们从材料结构、界面特性与缺陷机制出发,系统比较 c-Si、mc-Si 与 a-Si:H 等三类 Si 基太阳能电池(图 2(a)~(c))中 I - V 曲线 S 形异常的成因、表现与应对策略。

2.1 c-Si 电池

c-Si 电池典型结构为:玻璃衬底/ SiN_x :H 抗反射层(70nm)/n 型 c-Si(180 μm)/ p^+ 发射极(250nm)/Al-BSF 背场层(800nm)。c-Si 电池在理想工艺条件下呈现理想二极管 I - V 特性,然而实验中常观察到非理想 I - V 特性,其中最令人关注的即为 S 形异常现象^[4]。c-Si 电池中的 S 形异常通常起源于入射面栅电极与 c-Si 间的非理想

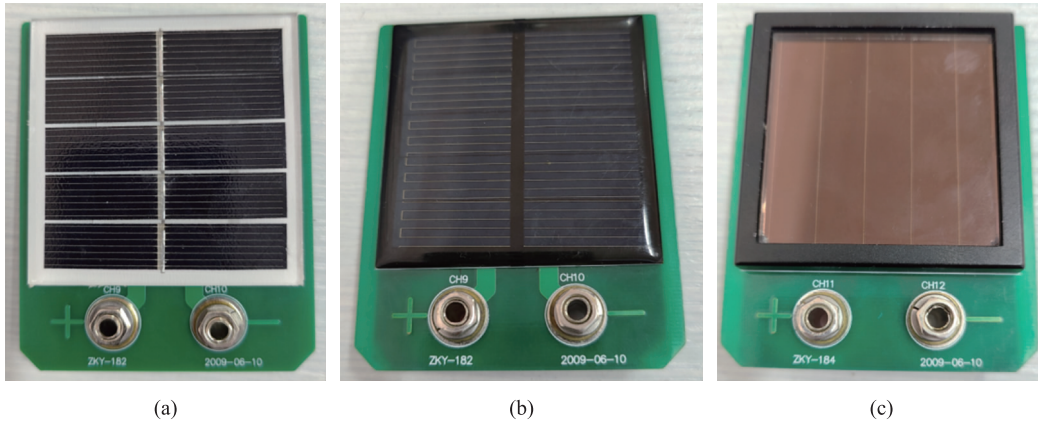


图2 教学中实际使用的三类硅基太阳能电池照片

(a) c-Si 电池; (b) mc-Si 电池; (c) a-Si:H 电池

Ohm 接触,使得 $I-V$ 特性发生畸变。金属/半导体界面的接触势垒高度 Φ_B 可通过金属功函数 (φ_m) 与 Si 电子亲和势 ($\chi_{Si} \approx 4.05\text{eV}$) 间的差值进行估算^[4]

$$\Phi_B = \varphi_m - \chi_{Si} \quad (1)$$

使用 Al、Ti 等典型金属栅电极与 n 型 c-Si 接触时, Φ_B 约 $0.2 \sim 0.6\text{eV}$ 。但当使用 Pt、Pd 等功函数较高的金属做栅电极,其 φ_m 约 5.2eV , Φ_B 可达约 1.1eV ,远高于理想 Ohm 接触所需的约 0.1eV 阈值^[8]。该接触势垒将使多数载流子,也即 n 型 c-Si 中的电子,在低偏压下难以逾越界面,故而形成输运障碍,宏观表现为 $I-V$ 曲线在低电压区的电流被显著抑制。直到外加偏压逐渐升高,势垒通过 Fermi 能级调节有效降低时,电流才迅速增加, $I-V$ 曲线整体呈现出 S 形异常。

另一方面,当背电极功函数与 p 型 c-Si 的价带能级相差较大时,也会产生金属/半导体接触势垒。例如,背电极为 Al 时,其功函数为 4.2eV ,与 p 型硅(掺杂浓度约 $10^{16} \sim 10^{17}\text{cm}^{-3}$)的价带顶具有约 $0.3 \sim 0.6\text{eV}$ 的势垒高度差^[3,4]。由热电子发射模型(thermionic emission model),接触处电流密度 J_{TE} 可表示为^[4]

$$J_{TE} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \quad (2)$$

其中, A^* 为有效 Richardson 常数, T 为绝对温度, q 为电子电荷, k 为 Boltzman 常数, V 为外加偏压。Richardson 常数反映了材料中电子向势垒发射能力的上限,即材料的本征热发射能力。 A^* 与金属/半导体接触的整流能力有关。 A^* 越大,

则表明在相同温度和势垒下的电流密度越大。对于 c-Si, A^* 约 $112\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$,显著高于氢化非晶硅(a-Si:H)或钝化层薄膜材料,说明 c-Si 具有良好的热发射特性,但在实际器件中其表现往往被表面态、界面缺陷等多种因素限制。低偏压下,由于 Φ_B 较大,界面输运电流被显著抑制,形成明显的 $I-V$ 特性平台。当外加偏压增至接触势垒高度附近,电流才可急剧增加,并形成 $I-V$ 曲线 S 形异常。

通过改变温度,可有效调控电池性能与界面势垒行为。低温条件下, c-Si 电池中杂质原子的电离度显著降低,金属/半导体接触处的势垒效应更加显著。有效掺杂浓度 ($N_A^{\text{eff}}(T)$) 与温度 (T) 间关系为^[3]

$$N_A^{\text{eff}}(T) \approx N_A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3)$$

其中, N_A 是杂质总掺杂浓度, E_a 是原子电离能。以 B 元素掺杂为例,其掺杂于 Si 中时的原子电离能 (E_a) 约 45meV 。当温度由室温降至约 200K 时, B 杂质电离度从约 100% 降至 50% 以下^[5]。此时, c-Si 电池内建电场明显减弱,空间电荷区变宽,载流子输运受阻,金属/硅界面势垒对电流输运的限制作用更加明显,在低电压区域更易观察到明显的 S 形异常。

为消除 c-Si 电池中的 $I-V$ 曲线 S 形异常现象,业界主流工艺包含两种路径。一是在背接触区域重掺杂一层极薄的重掺杂 p 型 c-Si 层,典型厚度约为 $10 \sim 100\text{nm}$,掺杂浓度可达 $10^{19} \sim 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 量级^[5]。由于该 p^+ 层很薄,不会对光吸

收或载流子输运造成影响。该方法能显著降低金属与硅间的 Schottky 势垒,使其接近于 0,从而实现近理想的 Ohm 接触,消除 S 形异常。相应地,电池 FF 因子由约 60% 提高至约 80%,而 PCE 提高 1%~3%^[6]。另一种方法是在 c-Si 与背电极金属界面间引入极薄的隧穿氧化层接触结构(tunnel oxide passivated contact, 缩写:TOPCon),如 1~2nm 的 SiO_2 或 Al_2O_3 层,以降低界面缺陷态密度,并形成隧穿势垒,实现消除 S 形异常,从而兼顾高效率与低损耗^[8,9]。高质量生长的氧化层可有效阻止界面态将 Fermi 能级钉扎于陷阱态中,从而改善能带对准,实现更高的开路电压。这两项技术已在生产中广泛应用,成为主流 c-Si 高效器件设计的核心手段。

2.2 mc-Si 电池

mc-Si 电池典型结构为:玻璃衬底/ SiN_x :H 抗反射膜(70nm)/n 型 mc-Si(180 μm)/ p^+ 发射极(250nm)/Al-BSF 层(800nm)。mc-Si 太阳电池在结构上虽与 c-Si 电池相似,同为硅基 p-n 结,但 mc-Si 的多晶结构中广泛存在晶界、位错、晶粒间非晶区域及杂质偏析区等多种复杂缺陷,使其 I - V 曲线更易出现 S 形异常等非理想电学行为。晶界是 mc-Si 电池性能最重要的限制因素之一。mc-Si 材料晶界区域的缺陷态密度(D_{it})可高达 $10^{11} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 量级^[8,9]。高密度缺陷态可形成有效复合中心,使 mc-Si 中的载流子复合寿命(τ)降至 1~10 μs 量级,并在晶界处形成约 0.1~0.3eV 的局域势垒。此外,晶界区域由于大量 Fe、Cu 等杂质原子偏析而产生高密度深能级陷阱,导致晶界附近区域产生 Fermi 能级钉扎晶界两侧从而形成带状耗尽区,从而抬高局域势垒,引发空间电荷重分布,致使器件整体电场结构的非线性畸变。局域势垒高度(Φ_{GB})与 D_{it} 、晶粒内掺杂浓度(N)间的关系可由 Seto 模型描述^[9]

$$\Phi_{GB} \approx \frac{qD_{it}^2}{8\epsilon_{\text{Si}}N} \quad (4)$$

其中, ϵ_{Si} 为 mc-Si 材料的相对介电常数: $\epsilon_{\text{Si}} \approx 11.7$ ^[5]。以典型参数计算,当晶界态密度为 10^{12} cm^{-2} 、 N 为 10^{16} cm^{-3} , Φ_{GB} 可达 0.15~0.20eV。该势垒对载流子输运形成显著阻碍,使 mc-Si 电池出现非理想的 I - V 曲线特性,需采用双二极管模型(two-diode model)描述^[9]。此时,晶界区域

产生的附加电流 J_{GB} 可视为第二二极管电流(second diode current),通常服从具有高理想因子 n_{GB} 的指数模型^[9]

$$J_{GB}(V) = J_{02} \left[\exp\left(\frac{qV}{n_{GB}kT}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

其中, J_{02} 为晶界复合产生的反向饱和电流密度,通常约为 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ A/cm}^2$,远高于 c-Si 电池典型值 $10^{-12} \sim 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 。这种差异使得 mc-Si 电池在低偏压区出现显著的 S 形拐点, FF 因子由约 80% 降至 60%~70%,PCE 相应下降约 2%~5%^[9]。当 D_{it} 较高($\geq 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)或晶粒尺寸较小($\lesssim 10 \mu\text{m}$)时,晶界区域耗尽层互相交叠,晶界势垒效应极大增强,使得电流更难跨越晶界,局域载流子输运极为困难,最终表现为显著的 S 形异常。为精准表征该类复杂输运行为, I - V 曲线需采用修正双二极管模型(modified two-diode model)描述^[9]:

$$J(V) = J_{ph} - J_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V - JR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right] - J_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V - JR_s)}{n_{GB} kT}\right) - 1 \right] - \frac{V - JR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

式(6)右侧第一项 J_{ph} 为光生电流。第二项对应主结区电流,反映 p-n 结控制下的扩散-漂移输运机制,其中主结区反向饱和电流密度(J_{01})约为 $10^{-12} \sim 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 量级,其对应理想因子 n_1 接近 1。第三项对应晶界势垒引起的复合电流,其中理想因子 n_{GB} 通常大于 2。式(6)中,串联电阻(R_s)和并联电阻(R_{sh})体现了载流子在晶界势垒处的额外输运损失。mc-Si 电池的 R_s 可高达 5~10 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,远高于 c-Si 中的 $\sim 0.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$,体现出晶粒间电势分布的不均匀性。其本质源于电流在晶粒穿越过程中的晶界势垒逾越行为^[4]。 R_{sh} 可表征晶界弱结合区或工艺不良造成的电流旁路行为,其等效路径往往非均匀分布于器件边缘或背电极钝化层局部缺陷处。因此,对于 mc-Si 电池,双二极管模型可更好地反映 mc-Si 材料内部非均匀结构对载流子输运行为的系统性扰动。它不仅揭示了 mc-Si 电池中 I - V 曲线非理想性的本征来源,也将材料结构、界面物理、电场分布及输运机制整合为可量化的物理模型。

为深入理解 mc-Si 电池中的非理想载流子输运行为,需将温度作为核心控制变量引入实验测

量及理论分析。mc-Si 电池中的晶界复合与势垒效应在低温条件下显著增强,成为了限制器件性能的重要因素。这主要是由于晶界势垒对载流子的热激发电流产生强烈抑制,其势垒高度 Φ_{GB} 在低温下的影响极大增强,显著降低了载流子越过势垒的能力。当温度降至约 250 K 以下时,电流输运明显受限, I - V 曲线出现 S 形异常^[10]。这一现象与肖特基势垒(Schottky barrier)中热发射机制具有相似的物理基础。教学中,我们通过液氮冷却方法构建低温环境,学生能够直观观察到随着温度逐步下降,mc-Si 电池的 I - V 曲线由轻微弯曲逐渐演化为明显的 S 形异常。

生产中,为提升 mc-Si 电池性能,可采用多种表面处理工艺提升界面性能。表面钝化是其中关键手段之一,常见方法是在电池表面热氧化形成 SiO_x 层(厚约 10~20nm),并以 PECVD 方法沉积 Si_3N_4 层(厚约 70~80nm),以降低表面态密度,抑制复合损失,将少子寿命提至 200~400 μs 。然而若工艺控制不当,例如沉积温度高于 450 $^{\circ}\text{C}$,或 NH_3/SiH_4 进气比例失调,钝化层本身可能也引入新的界面态。由 Anderson 能带模型理论,这些界面态会在原有晶界势垒基础上产生额外势垒区,形成多重势垒结构,干扰光生电流的稳定传输^[8,9]。此类复合势垒叠加效应往往使 I - V 曲线出现双重拐点或不对称输运特征。对这类非理想行为建模时,需引入多个势垒区和电荷积聚层的串并联等效结构,并反推界面势垒高度、界面态密度及其空间分布规律。可通过不同表面处理样品的系统测量与对比,区分晶界势垒与钝化引发界面势垒的各自影响,从而明确它们在电流输运过程中的独立贡献,为后续工艺优化提供数据支撑与判断依据。

2.3 a-Si:H 电池

a-Si:H 电池典型结构为:玻璃衬底/ITO 层(100nm)/p 型 a-Si:H(20nm)/本征 a-Si:H 吸收层(300nm)/n 型 a-Si:H(30nm)/Ag 背电极(200nm)。该 p-i-n 结构通过本征层实现光吸收与电荷分离,在高缺陷密度和强界面效应主导下,其载流子输运行为与 c-Si 电池具有显著差异。氢化(hydrogenate)是指在非晶硅(a-Si)层沉积过程中引入 H 原子,使其与 Si 网络中的悬挂键结合,以显著减少缺陷态密度^[3,4]。由于原初 a-Si 材料中存在大量未配对悬挂键等缺陷,可形成载流子

复合中心制约电池性能。氢化处理可有效钝化缺陷,提高载流子寿命和电荷输运效率。a-Si:H 显著的非晶态结构导致其固有缺陷密度(N_t)远高于 c-Si 材料,通常达 $10^{16} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 量级。这些缺陷可在能隙中形成连续态密度分布,可采用 Urbach 指数尾态(Urbach tail states)与深缺陷态模型描述^[3,4]。高密度缺陷态显著降低载流子扩散长度至 100~500nm,并严重影响界面 Fermi 能级对齐,使得电池 I - V 曲线出现明显的 S 形异常。

a-Si:H 电池中, I - V 曲线 S 形异常现象尤为普遍。其关键原因是 p/i 界面存在显著的能带失配与高界面缺陷态密度。a-Si:H 电池中 p 型 a-Si:H/透明导电氧化物(TCO)电极间界面常出现能带失配引起的势垒效应。以氧化铟锡(ITO)为例,其功函数约 4.7~4.9eV,而 p 型 a-Si:H 层的 Fermi 能级在体掺杂浓度为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 时位于价带上方 0.1~0.3eV,即约 5.0~5.2eV。这意味着 ITO 与 p 型 a-Si:H 层间存在高达 0.3~0.5eV 的界面势垒^[5]。受其影响,空穴注入过程在低电压区受阻,表现为约 0.4V 以下的低偏压区电流受到严重抑制,形成 S 形异常。当外加电压超过势垒临界电压时,电流方才恢复增长。一般而言,当界面势垒 ΔE 约 0.3eV 时,在 300K 温度条件下输运电流降低一个数量级以上,使 FF 因子由 70%~75%降至 50%以下,而 PCE 由约 10%降至 5%~7%^[5]。通过在 p 型 a-Si:H 和 TCO 之间插入一层超薄(厚约 2~5nm)、高掺杂浓度的氢化微晶硅($\mu\text{c-Si:H}$)层,可显著降低界面势垒至 0.1eV 以下,使 I - V 曲线恢复理想形态。

a-Si:H 电池中,界面处通常含有高密度的缺陷态,导致 Fermi 能级钉扎。其 p/i 界面处若存在 $10^{12} \sim 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 量级的界面态密度,便足以形成 0.2~0.4eV 的显著界面势垒^[4]。接近开路电压(V_{oc})条件下,本征 i 层内的内建电场(E_{bi})明显下降,接近于零,此时势垒对载流子的阻碍大幅增强,而载流子跨越势垒的热激发电流显著减小,导致 I - V 曲线在偏压为 0.5~0.8V 附近时电流受抑制,产生 S 形异常。由缺陷态引起的界面势垒高度 ΔV_{int} 可建模表征为^[5]

$$\Delta V_{int} = \frac{qD_{it}\Delta E_F}{\epsilon_0\epsilon_r} \quad (7)$$

其中, D_{it} 为界面缺陷态密度, ΔE_F 为界面 Fermi 能级差, ϵ_r 为 a-Si:H 材料的相对介电常数为相

对。对于 a-Si:H 电池中典型 p/i 界面, D_{it} $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 量级, 使得 ΔV_{int} 达 $0.2 \sim 0.4 \text{ eV}$, 从而显著阻碍载流子传输, 形成 S 形异常。

与其他种类太阳能电池不同, a-Si:H 电池的特殊之处还在于其具有明显的 Staebler-Wronski 光致衰减效应。光照下, a-Si:H 中的弱 Si-Si 键可断裂生成额外的悬挂键缺陷, 导致原本已较高的缺陷态密度从 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 增至 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 并引入新的复合中心^[3,5]。这些光致生成的缺陷在室温下具有较长寿命, 难以自发恢复。它们进一步加剧了载流子界面复合损失, 并显著强化 p/i 界面处的势垒效应, 造成了电池性能的光致衰减。光照条件下 Staebler-Wronski 效应的时域演化可建模表征为^[3,5]

$$N(t) = N_0 + \Delta N_t \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{sw}}\right) \right] \quad (8)$$

其中, $N_t(t)$ 为时刻 t 时 a-Si:H 层内的缺陷密度, $N_{t0}(t)$ 为初始缺陷密度, ΔN_t 为最大附加缺陷密度, τ_{sw} 为 Staebler-Wronski 效应的特征时间常数。对于 a-Si:H 材料, τ_{sw} 典型值 $1 \sim 10 \text{ h}$, 一般通过深能级瞬态光电流 (DLTS) 方法测量。 τ_{sw} 与 a-Si:H 材料质量、掺杂浓度以及光照条件等因素有关。光诱导缺陷进一步增强了界面势垒和复合, 从而加剧光照下 S 形异常。

一个标准太阳照射 (AM1.5, 100 mW/cm^2) 条件下, 经过 100 小时光照后, a-Si:H 电池的 V_{oc} 可降低 $50 \sim 100 \text{ mV}$, FF 因子由约 70% 降至 50% 以下, 同时 $I-V$ 曲线出现 S 形异常。为改善电池 Staebler-Wronski 光致衰减问题, 可从 a-Si:H 薄膜内、界面及器件结构等多角度优化工艺。首先, 在 i 层沉积阶段, 可通过提高基板温度至 $200 \sim 250^\circ \text{C}$ 并优化 SiH_4/H_2 气体流量比, 促进薄膜部分微晶化以减少弱 Si-Si 键。其次, 在 p/i 和 i/n 界面处增设 $2 \sim 5 \text{ nm}$ 超薄高掺 $\mu\text{c-Si:H}$ 缓冲层, 以降低界面缺陷态密度并稳定能带排列。再次, 可在器件封装前实施 H_2 气氛退火, 以进一步修复光照诱导的缺陷, 并采用周期性光照应力耦合退火方法, 即使光照与热退火交替作用, 以达到更彻底的缺陷恢复。最后, 可优化 p 层掺杂浓度, 并在 TCO 沉积前开展等离子体活化处理, 以增强界面钝化效果并稳定空穴注入, 降低接触电阻至 $1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 量级, 提高开路电压稳定性, 从而综合提升 a-Si:H 电池发电能力与光稳定性^[5]。

综上, a-Si:H 电池的 S 形异常是多重界面势垒、Fermi 能级钉扎以及高密度缺陷态共同作用的结果, 而这些因素又与 a-Si:H 材料本身的非晶态结构和光致衰减效应紧密相关。教学中, 通过定量分析载流子输运的理论模型、能带弯曲和缺陷态密度演变规律, 将能有效培养学生深刻理解复杂半导体器件背后的深层物理机制, 并帮助他们运用这些知识进一步服务于太阳能电池科学研究。

3 教学启示与课程融合

综合以上对 c-Si、mc-Si 和 a-Si:H 三种太阳能电池的分析, 可看出 S 形 $I-V$ 曲线测量结果虽然表现为相似的宏观现象, 但却深刻体现出了材料特性差异。教学中, 产生 $I-V$ 曲线 S 形异常现象的深层物理机制可反溯至半导体物理、材料科学及电子器件工程的学科交叉领域, 为深化拓展课程内容提供了良好契机。我们尝试引导学生从观察宏观电学特性出发, 促使他们主动反溯电流电压关系、电势能、欧姆定律与非欧姆导电、电场叠加原理等“大学物理”课程基础知识, 并帮助其深入学习和掌握能带结构、Fermi 能级钉扎效应、界面势垒及载流子输运理论等多种“半导体物理学”课程中的重要概念。

3.1 教学目标设计与改革

考虑到本科学生普遍已完成“大学物理”“电路基础”等课程的学习, 已具备基本的推导能力与物理量纲分析意识。在高年级阶段, 他们逐步接触“固体物理”“半导体物理”“材料科学基础”等专业核心课程, 具有一定的跨课程知识迁移能力。随着科研意识的日益增强, 许多学生展现出强烈的自主探究欲望和参与科研过程的意向。基于这一学习心理与认知基础, 我们构建了递进式、多维度的教学目标体系, 旨在从知识理解、逻辑建模到实际问题层层推进, 帮助学生在实验任务中实现从知识接受者向科研探索者的身份转变。

为此, 我们设定了明确而分层次的教学目标。基础层次上, 学生需精准识别 S 形异常现象, 能够从测量数据中识别并清晰描述 $I-V$ 曲线的 S 形异常特征。进阶层次则要求学生追溯固体物理、半导体物理等理论课堂上学习的知识, 如界面势垒、Fermi 能级钉扎、载流子复合与输运理论等, 系统

分析异常现象背后的微观机制。高阶目标则鼓励学生主动利用双二极管模型等物理模型,结合 AMPS 仿真软件深入分析器件结构、缺陷分布与界面物理参数对电池 I - V 特性及其非理想行为的影响。为实现上述教学目标,团队实施了一系列创新举措。首先,我们扩充了实验内容范围,在原有三类硅电池基础上,引导学生测量 GaAs、CdTe、钙钛矿等多种类型的太阳能电池,使学生能够更全面地观察与研究各类电池的 I - V 曲线特性差异。其次,我们对实验条件设置进行了扩展。引入低温、高温、不同光强度(0.1~2.0 个标准太阳光强范围)、正反向电压扫描等多种实验条件,以引导学生进行深入定量分析,揭示环境条件对 S 形 I - V 曲线的影响规律。此外,我们在教学过程中积极鼓励学生追溯已有知识体系,从载流子输运理论、界面态效应、晶界复合以及界面势垒机制等角度出发,提出清晰的物理假设,并设计对应的实验方案进行初步验证。

我们向学生介绍了 AMPS 仿真软件,并设立软件培训环节,使学生能够熟练进行器件结构模型构建与参数调控,从而深入理解实验现象背后的微观物理本质。学生根据不同类型的硅基太阳能电池选择适合的结构模型。在 AMPS 平台上,学生首先输入能带宽度、带隙大小、载流子迁移率、掺杂浓度等材料基本参数,并设置不同材料层之间的界面势垒,通过仿真调整界面势垒的高度,观察其对 I - V 曲线形态的影响。学生还可通过设置缺陷态密度,模拟由高密度缺陷引发的载流子复合效应。通过调节缺陷态的密度与分布,学生可直观了解缺陷在电池性能中的作用,进而理解其对 S 形异常现象的贡献。通过以上步骤,学生能够分析各重要参数对 I - V 曲线形状的影响,探索 S 形异常的出现条件,进而验证仿真模型的准确性。通过这一过程,学生能够将理论知识与实际仿真技能有效结合,从而培养其开展自主科研探索和分析数据的能力。

3.2 扩展实验项目设计

为切实推进高校物理实验教学从“结果导向型”向“过程驱动型”、从“验证式训练”向“研究导向式探究”的教学范式转型,本教学单元面向物理、材料、能源等理工科专业学生,围绕“硅基太阳能电池 I - V 曲线 S 形异常识别与机制解析”这一综合性电学测量任务,构建多尺度、多层次的“现

象驱动-模型反溯-仿真验证”教学闭环,旨在实现从知识学习到能力建构的完整覆盖。课程共计 6 学时,按照“理论导入、实验操作、现象分析与模型构建、仿真验证”的进阶逻辑展开。其中,前 2 学时通过课堂讲授与案例分析,帮助学生理解太阳能电池工作原理、 I - V 曲线测量理论与 S 形异常的物理机制。第 3~4 学时为实验操作,学生将独立完成三种 Si 基电池在不同实验条件下的 I - V 曲线测量,识别异常曲线特征并提取关键参数。第 5 学时通过小组研讨与教师引导,学生基于实验数据构建双二极管或修正电路模型,探讨界面势垒、缺陷态等机制假设并提取相关参数。最后 1 学时进行 AMPS 仿真训练,学生将通过调控界面与缺陷参数重现 S 形异常,实现机制反推与模型验证。课程同步引入 Rubric 评价体系与课后延展项目,以强化学生的因果推理与综合建模能力。

在教学导入阶段,我们将以往直接给出理论模型与实验步骤的方式转变为通过启发性问题引导学生构建认知图谱,通过提出“为何理想 I - V 曲线在实验测量中会出现 S 形异常?”“是否可以通过改变温度或光照条件验证异常曲线与界面态密度或势垒结构的关系?”等问题,引导学生主动思考实验现象背后的物理机制,并反溯至基本物理原理。在实验操作层面,我们打破以往单一结构、单一条件测量的模式,引入了多材料、多结构、多变量的实验系统,指导学生进行正向/反向扫描速率控制和扫压方向变化等测试,以精确提取 I - V 曲线中 S 形异常出现的临界条件。通过设置上述实验条件,增强学生对多因变量影响关系的直观理解,也为其后续的建模分析提供数据支撑。在数据分析与模型验证阶段,团队充分保障实验设计的完整性、数据归一化处理的逻辑严密性以及理论建模与实测结果之间的匹配度。每个学生小组需独立完成实验设计报告,其中需包含所用器件的物理结构说明、预期行为的理论推导、测量参数的控制策略以及 I - V 曲线特征点的定量提取方法。我们鼓励学生在分析过程中尝试使用双二极管等效电路模型拟合其测量结果,并对模型中各项参数进行物理意义解释与比较。同时,团队引入 AMPS 仿真平台作为数据反演与理论验证工具,以帮助学生搭建太阳能电池结构、设定界面势垒、电荷陷阱态密度分布及复合模型参数,使学生

能够基于实验数据构建完整的模拟器件结构,清晰地验证界面复合与势垒效应对载流子运输的具体影响。

所采用的课程评估体系涵盖五大维度。一是学生对 S 形 I - V 曲线特征的识别能力与理论解释深度,考查其对实验现象的准确判断与物理机制的清晰理解。二是实验数据的完整性与变量控制的合理性,评估电池产电能力测试过程的操作规范性。三是学生在机制假设与模型建构方面的理论深度与创新视角,突出其物理建模能力。四是仿真建模能力与参数调控能力,检验其对器件参数变化规律的理解。五是学生在实验过程中表现出的独立思考能力、实验设计创新性和科学表达逻辑,关注其创新能力培养。

为提升教学反馈效果,我们引入了基于 Rubric 评分机制与同伴互评体系,并通过教师点评、小组互评及口头答辩形式多维度反馈,帮助学生系统性发现问题与进步路径。Rubric 评分机制包含了五大评分维度,共 20 个具体指标,每个指标采用 5 级评分量表(1~5 分),总分满分为 100 分,分别对应“基本不达标”“有待改进”“达到预期”“较好完成”“表现优异”五个等级,确保评估的客观性与可操作性。在“知识理解与应用”维度中,重点评价学生对 S 形 I - V 曲线物理机制的掌握程度(共计 10 分)。“实验设计与执行”维度中,考查变量控制的严谨性、测量方法的规范性与实验日志记录的完整性(共计 25 分)。“数据分析与建模”维度中,评估学生是否能准确完成参数拟合、模型解释与残差分析(共计 20 分);“仿真模拟与结果验证”维度包含 AMPS 仿真结构设置、边界条件选取与参数敏感性分析能力(共计 25 分)。“科学表达与反思提升”维度则涵盖学生的口头答辩逻辑性、图表表达规范性以及反思报告的深度(共计 20 分)。每轮实验结束后,学生需提交不少于 3000 字的实验报告,并进行 10 分钟的小组汇报答辩。教师结合 Rubric 标准逐项打分,学生需对同组其他小组成员完成至少 3 份互评问卷,每份包含定量评分与定性反馈两个部分,互评分布系数设为最终成绩的 15%。Rubric 评分机制增强了评估过程的透明度与可信度,也为学生提供了明确的努力方向与自我提升路径。多环节、全流程、工具嵌入式的教学改革策略显著增强了学生对半导体物理器件工作原理的理解能力,全面

提升了其问题发现、假设构建、数据建模与科学表达的综合科研素养,真正实现了“以学促研、以研带教”的教学目标。

3.3 与科研衔接

为有效拓展学生科研视野,我们在大学物理实验课程中开展了针对 S 形异常现象的教学深度延伸并对接科研,旨在帮助学生从传统硅基器件出发,进一步探索多材料、多物理机制交叉的新型光伏体系,从而完成由“硅器件物理”向“系统级能源材料科学”的知识范式跃迁。将真实科研问题引入教学场景中,以此训练学生将理论模型转化为可模拟结构的能力,掌握“文献解读、物理提炼、模型重建、数值验证”的完整研究链条,其整体教学思路示于图 3。

当前光伏技术体系正经历代际跃迁,新出现的光伏材料性能日新月异。第一代光伏技术主要以硅电池为代表,已具备成熟的制造工艺和稳定的工作性能,目前占据市场主导地位。第二代光伏技术则引入了碲化镉(CdTe)、铜铟镓硒(CIGS)等成本更低、制备工艺更灵活的薄膜太阳能电池,适用于轻质和柔性应用场景。进入第三代光伏技术阶段,研究重点转向更高光电转换效率、更低制造成本以及更广泛应用场景的探索。典型代表包括钙钛矿太阳能电池^[11,12]、染料敏化太阳能电池、有机光伏器件^[13-15]、量子点太阳能电池、III-V 族多结太阳能电池以及基于石墨烯、过渡金属二硫化物等二维材料的异质结光伏器件等。这些新型光伏技术在可印刷性、柔性、透明度以及集成能力等方面展现出显著优势,有望突破传统光伏在建筑集成、可穿戴设备和空间应用等领域的限制。新兴器件结构往往涉及强烈的界面不连续性、能带失配以及缺陷驱动的非平衡态运输问题,成为 I - V 曲线 S 形异常高发的“物理温床”^[13-15]。教学设计中,我们通过拓展性课程模块,系统引导学生分析上述复杂体系中 S 形异常的产生物理机制,建立清晰逻辑连接。

以钙钛矿太阳能电池为例,教学中,我们阐述了其“软晶格结构”带来的离子迁移特性、载流子复合路径不稳定性及界面偶极层调控的复杂性^[16-19]。在其典型 n-i-p 结构中(如:FTO/c-TiO₂/MAPbI₃/spiro-OMeTAD/Au), spiro-OMeTAD 等空穴传输层与钙钛矿吸收层间易形成高势垒区,其价带高度差可达 0.3~0.5 eV,加之此界面



图3 与科研衔接的教学思路示意图

处缺陷态密度高,极易诱发空穴堆积,从而在低偏压区抑制光生电流输出,形成正向扫描时的S形异常。相应地, FF 因子由约80%降至<65%,并使PCE下降2%~4%。此外,钙钛矿层中发生的离子迁移还会在电压连续扫描过程中引起界面电荷重新分布,并引起回滞现象(hysteresis),进一步加剧 $I-V$ 曲线畸变。为准确测量器件性能,需采用稳态扫描(steady-state scan)或最大功率点追踪(MPP tracking)方法,以规避离子动态响应造成的赝信号。在25℃工作条件下保持10 min稳态光照后,即可显著抑制回滞效应,测量得到器件真实PCE。

以钙钛矿电池相关理论为基础,教师进一步引入有机太阳能电池领域知识。我们着重向学生介绍了有机半导体本征迁移率低(约 $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)、激子扩散长度有限(约10 nm)和强双极性输运不平衡所带来的多重限制^[13-14]。此外,金属-有机界面常见的Fermi能级钉扎效应破坏了理想的能带对准,导致界面注入障碍显著,进而出现电流钳制、低偏压电流平台等典型S形特征。在有机太阳能电池教学环节中,为引导学生深入理解S形 $I-V$ 曲线异常的成因,教师通过引入经典P3HT:PCBM体异质结结构与Y6、ITIC系列等非富勒烯受体(NFA)材料,系统讲解其界面势垒形成的差异化机制及其对载流子注入行为的深远影响。在P3HT:PCBM体系中,虽然电荷分离效率相对较高,但其在PEDOT:PSS阳极界面与有机层之间存在功函数不匹配等问题,易产生界面势垒,导致空穴提取受阻,进而诱发低电压区域的S形异常 $I-V$ 曲线。尽管PEDOT:PSS具有良好的导电性和成膜性,但其强酸性与水溶性在物理稳定性和能带匹配性等方面存在较多局限,易引发界面退化和陷阱态累积^[13-14]。我们通过引导学生分析

KPFM实验数据,深入讲解功函数错配通过调控界面电势影响Fermi能级定位,引发空穴钝化障碍,从而在宏观 $I-V$ 曲线中表现为低偏压区电流抑制的基本原理。另外,在采用Y6、ITIC-4F等NFA的高性能体系中,电子亲和势及HOMO/LUMO能级结构的高度可调性使其与PM6、PB-DB-T等高效供体材料间的能级匹配更为精细,有效提高了界面电荷分离所需的内建场强。然而,若未能同步优化PFN、ZrAcac或PDINN等阴极缓冲层,则极易在Ag/Al等金属阴极与活性层间形成电子注入势垒,进而在器件阴极侧形成载流子堆积,导致电子空间电荷层增厚,引发电场畸变与S形异常。

教学中,我们引导学生拓展学习内容,尝试基于Poisson-Nernst-Planck方程组、Marcus理论与电荷转移积分模型,主动推导势垒高度与载流子注入速率(k_{inj})间的指数衰减规律,使之理解非Ohm接触导致的局部电场屏蔽与电荷积聚是形成有机太阳能电池S形异常的微观物理根源之一。通过对比掠入射广角X射线散射(GIWAXS)与时间分辨微波电导率技术(TRMC)测试数据,讲授供受体之间的分子取向、 $\pi-\pi$ 堆叠距离与载流子迁移率(μ_e/μ_h)失衡对注入对称性的影响,并结合DFT计算结果引导学生理解界面能带弯曲与陷阱辅助隧穿机制如何在低光照强度下进一步放大S形异常。通过以上综合训练,学生能够在理解有机光伏器件 $I-V$ 曲线S形异常机制的同时,掌握界面化学调控、电极工程与输运模型间的逻辑联动机制,为其未来从事光电器件设计与表界结构调控相关科研工作奠定坚实的理论与方法基础。

课堂上,我们进一步讲解了叠层电池相关知识,并介绍III-V族多结太阳能电池的结构复杂性

所带来的多层次 S 形异常现象,阐述子电池间电流匹配与界面复合协同作用对叠层电池整体光伏性能的影响^[14]。在串联结构中,最弱子电池的 I - V 特性将限制总电流输出,而若中间隧穿结界面存在能带偏移或势垒结构,则容易形成跨结势垒(inter-junction barrier),在 I - V 曲线上表现为多级平台。通过构建多子电池联立模型,从能带连续性、载流子准 Fermi 能级耦合、隧穿机制和光谱匹配等多个角度出发,可系统分析 I - V 曲线 S 形异常背后的物理机制耦合关系。查阅高效 GaAs/InGaP/Ge 叠层电池的最新研究成果后,学生可进一步理解使用高温退火、制备钝化中间层和重掺杂缓冲层等先进工艺提升电池性能的科学原理。为进一步提升学生的应用导向理解,团队特别引导其结合具体工程背景,分析 I - V 曲线 S 形异常在不同应用场景中的性能影响。例如,在航天工程领域广泛采用的 III-V 族高效太阳能电池中, I - V 曲线的微小畸变将放大至功率密度、热控管理、辐照稳定性等关键参数上,进而影响航天器能源系统的运行效率与安全冗余。我们鼓励学生从工程指标出发,结合实验或模拟数据提出定量优化路径^[20]。

作为课程拓展,我们倡导以“材料体系、器件架构、性能调控、应用背景”为核心的四维分析框架,指导学生在多个材料平台上开展自主学习与比较性研究。例如,鼓励学生分析“在 CdTe、CIGS 等第二代薄膜器件中,CdS 缓冲层与主吸收层间的能带台阶如何影响界面势垒形成与 S 形曲线演化”“在量子点或二维材料异质结太阳能电池中,界面载流子转移动力学如何因尺寸量子化效应而改变”等研究性课题,为学生提供构建跨体系认知能力的科研平台。在深入掌握光伏产能机制的基础上,帮助他们理解 S 形异常可作为性能“指纹”,以揭示电池中本征物理过程的复杂性。此外,课程还设置柔性可穿戴光伏系统中的“S 形-机械耦合放大机制”分析模块,要求学生探索在多轴弯折条件下,由于器件机械应力诱发界面剥离与能带偏移所导致的局部势垒增长,进而加重 S 形异常程度的可能机制。提出引入界面偶极层、提升掺杂浓度梯度或优化接触层亲和势等工程手段,以期实现器件性能提升的定量预测。

综上,通过系列教学创新,学生将可掌握 I - V 曲线 S 形异常的形成物理机制,并将理论知识迁

移应用于第三代光伏器件的性能建模、材料选择与界面设计中,从而形成跨学科、跨尺度、跨应用场景的复合型认知能力,真正实现从“学科学习”到“科研训练”再到“工程思维”的全链条教育转化。

4 结语

本文以 c-Si、mc-Si 与 a-Si:H 三类典型硅基太阳能电池为研究对象,系统剖析了其实验测量 I - V 曲线过程中出现的 S 形异常现象,并从微观物理机制、材料界面行为、器件结构响应和教学实践等维度进行了探讨。教学团队运用能带对准理论、界面态模型、载流子输运与复合动力学等多种物理框架,阐明了 S 形异常的主要根源在于界面能带未对齐、界面缺陷态密度过高、势垒区电场反转及非平衡载流子局域积聚,进而导致光生载流子输运受阻、复合几率提升和电流输出受限。在教学层面,团队以此为切入点,构建了一套涵盖理论建模、实验验证与仿真模拟的多维实验教学体系。以“异常”为起点的反溯教学策略可引导学生追溯固体物理、半导体物理等基础知识,提升对载流子输运过程、电荷复合行为与界面能带调控的认识,并锻炼其物理建模能力和数据分析能力,为他们进一步开展高水平科研训练打下了坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 谢子昂,张师平,陈森,等. 大学物理实验课反溯教学方法研究[J]. 物理与工程, 2023, 33(4): 107-120.
XIE Z A, ZHANG S P, CHEN S, et al. Research on backward teaching method in university physics experiments[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 107-120. (in Chinese)
- [2] 吴平. 大学物理实验教程[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
WU P. University Physics Laboratory Course[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [3] 刘恩科. 半导体物理学[M]. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
LIU E K. Semiconductor Physics[M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017. (in Chinese)
- [4] WÜRFEL P. Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts[M]. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

- [5] FONASH S J. Solar Cell Device Physics (2nd ed.) [M]. London: Academic Press, 2010.
- [6] 李莉, 张师平, 裴艺丽, 等. 基于反溯教学法的物理实验课程思政建设的探索[J]. 物理与工程, 2023, 33(4): 85-94.
LI L, ZHANG S P, PEI Y L, et al. Exploration of ideological and political education in physics lab course based on backward teaching method[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 85-94. (in Chinese)
- [7] 吴平. 理科物理实验教程: 力学、热学、电磁学、光学实验分册[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2022.
WU P. Course in science physics experiments: Volume on mechanics, thermodynamics, electromagnetism, and optics experiments [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2022. (in Chinese)
- [8] SCHRODER D K. Semiconductor Material and Device Characterization [M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [9] FISCHETTI M V, VANDENBERGHE W G. Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures[M]. Cham: Springer, 2016.
- [10] 颜世珍. 浅析热斑光伏组件的危害控制[J]. 太阳能, 2025, (1): 103-108.
YAN S Z. Analysis of hazard control for hotspot photovoltaic modules[J]. Solar Energy, 2025, (1): 103-108. (in Chinese)
- [11] 刘竞贤, 陈考铭, 马韵涵, 等. 有机/无机杂化钙钛矿太阳能电池 S 形电流扭结的集总参数等效电路模型[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(5): 746-751.
LIU J X, CHEN K M, MA Y H, et al. Equivalent circuit model of the S-shaped current hysteresis in organic/inorganic hybrid perovskite solar cells[J]. Materials Research and Applications, 2022, 16(5): 746-751. (in Chinese)
- [12] YANG C, HU W, LIU J, et al. Achievements, challenges, and future prospects for industrialization of perovskite solar cells[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 227.
- [13] QIN J, CHEN Z, BI P, et al. 17% efficiency all-small-molecule organic solar cells enabled by nanoscale phase separation with a hierarchical branched structure[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(12): 5903-5910.
- [14] 刘璋, 陈新亮, 侯国付, 等. 高效钙钛矿太阳电池及其叠层电池研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(15): 15031-15046.
LIU Z, CHEN X L, HOU G F, et al. Research progress of efficient perovskite solar cells and their tandem solar cells[J]. Materials Review, 2021, 35(15): 15031-15046. (in Chinese)
- [15] 刘彦甫, 李世麟, 荆亚楠, 等. 有机太阳能电池性能衰减机理研究进展[J]. 化学学报, 2022, 80(7): 993-1009.
LIU Y F, LI S L, JING Y N, et al. Progress on performance degradation mechanism of organic solar cells[J]. Acta Chimica Sinica, 2022, 80(7): 993-1009. (in Chinese)
- [16] 王栋, 朱慧敏, 周忠敏, 等. 溶剂对钙钛矿薄膜形貌和结晶性的影响研究[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 038403.
WANG D, ZHU H M, ZHOU Z M, et al. Study on the effect of solvents on morphology and crystallinity of perovskite films [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 038403. (in Chinese)
- [17] 杨旭东, 陈汉, 毕恩兵, 等. 高效率钙钛矿太阳电池发展中的关键问题[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 038404.
YANG X D, CHEN H, BI E B, et al. Key issues in the development of high-efficiency perovskite solar cells [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 038404. (in Chinese)
- [18] CHEN P, LI T, YANG Y, et al. Coupling aqueous zinc batteries and perovskite solar cells for efficient solar energy storage[J]. Nature Communications, 2022, 13: 64.
- [19] XU J, CHEN Y, DAI L. Efficiently photo-charging lithium-ion battery by perovskite solar cell[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8103.
- [20] 马铭遥, 张志祥, 马文婷, 等. 基于 I-V 特性曲线的光伏组件电流失配故障诊断方法[P]. 中国专利: CN115208309B, 2024-04-02.
MA M Y, ZHANG Z X, MA W T, et al. Method for diagnosing current-mismatch faults in photovoltaic modules based on I-V characteristic curves [P]. Chinese Patent: CN115208309B, 2024-04-02. (in Chinese)