

GaInP/GaAs 太阳电池的柔性封装及稳定性*

吴晓旭¹⁾ 龙军华^{2)†} 孙强健¹⁾ 王霞¹⁾ 陈志韬²⁾ 于梦璐¹⁾
 罗骁龙²⁾ 李雪飞²⁾ 赵沪隐¹⁾ 陆书龙^{2)‡}

1) (中国科学技术大学纳米技术与纳米仿生学院, 合肥 230026)

2) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 苏州 215123)

(2023 年 3 月 9 日收到; 2023 年 4 月 28 日收到修改稿)

柔性 III-V 薄膜太阳电池通常被作为空间电源在航天器上使用, 而在实际应用中适宜的封装材料可以保护电池免受水分、氧化、污染物等环境因素的影响. 因此, 探究合适的柔性封装方案和电池性能的长期稳定性至关重要. 本文利用电阻焊方法将制备好的柔性双结 GaInP/GaAs 太阳电池进行焊接, 之后采用具有高透光性的薄膜材料和热熔胶与柔性电池进行层压封装并研究了其在恶劣储存条件下的性能稳定性和环境耐受性. 研究表明, 柔性封装太阳电池在 1000 h 以上的温度为 85 °C, 相对湿度 85% (85 °C/85% RH) 的湿热试验以及 108 次温度范围为 -60 °C—75 °C 的冷热循环老化试验后仍然保持了很好的稳定性, 表明封装工艺对柔性太阳电池具有较好的保护作用. 此外, 基于二极管模型的电学仿真结果表明, 柔性封装后电池性能的改变是由于载流子复合增强, 从而降低了开路电压.

关键词: GaAs 薄膜太阳电池, 多结太阳电池, 柔性封装, 可靠性

PACS: 88.40.jm, 88.40.jp, 88.40.ff, 88.40.fc

DOI: 10.7498/aps.72.20230352

1 引言

柔性多结 III-V 薄膜太阳电池因具有高效率^[1]、高柔性、轻量^[2]、抗辐照能力强^[3]等优势, 为需要供给电源的航天器如飞艇、无人机、卫星或空间站等^[4-7]提供了新的应用前景. 倒置多结电池具有更匹配的带隙宽度用来吸收光谱, 因而提高了电池的效率^[8-10]. 基于反向外延生长^[11]、外延层剥离^[12,13]、低温键合^[14]等技术的发展, 实现了薄膜电池外延层从刚性衬底到柔性衬底的转移, 且获得了较高的质量比功率^[15]. 考虑到最佳带隙组合和晶格匹配等因素, 主要针对 AlGaAs/GaAs 和 GaInP/GaAs 双结太阳电池进行探究. 由于 AlGaAs 中含 Al 量

过高易氧化从而影响电池性能^[16], 而 GaInP 的界面复合速率更低且与 GaAs 衬底和更高带隙的 AlInP 窗口层材料可具有良好的晶格匹配度^[17,18], 因此 GaInP/GaAs 双结电池被广泛使用. 目前, 为了增强对太阳光谱能量的吸收, GaInP/GaAs/InGaAs 三结电池也在逐步开发. 美国可再生能源实验室 (NREL) 用多个应变平衡 GaInAs/GaAsP 量子阱集成到双结 GaInP/GaAs (mqw) 和三结 GaInP/GaAs (mqw)/InGaAs 太阳电池中, 分别得到目前在 AM 1.5G 光谱下的最高效率记录 32.9% 与 39.5%^[19,20]. 在无量子阱特殊结构下, 双结 GaInP/GaAs 和三结 GaInP/GaAs/InGaAs 太阳电池在 AM 1.5G 光谱下的最高效率记录可以达到 32.8% 和 37.9%, 分别由美国 NREL 和日本 Sharp 公司

* 国家自然科学基金 (批准号: 61827823, 62274176)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20220292)、苏州市科技项目 (批准号: SYC2022123) 和中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所项目 (批准号: Y4JAQ21005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jhlong2017@sinano.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: sltu2008@sinano.ac.cn

创造^[1,8]. 高效多结太阳能电池可采用键合和外延剥离 (ELO) 等工艺步骤实现柔性电池的制备或衬底转移, 2013 年 Sharp 公司采用 ELO 和金属键合技术将 GaInP/GaAs/InGaAs 三结电池转移至 Si 衬底之上, 其效率为 37.7%^[21]. 2014 年 Alta Devices 公司采用键合柔性基底和 ELO 技术成功制备效率达到 30.8% 的薄膜 GaInP/GaAs 太阳电池^[22].

国内对于柔性多结太阳能电池的研究起步较晚, 相比国外先进水平还具有一定差距, 但在柔性多结太阳能电池的外延生长与柔性电池的工艺制备等关键技术领域也取得了一定突破, 乾照光电公司采用阶变缓冲层技术生长了晶体质量较高的 GaInP/GaAs/InGaAs 电池材料, 转换效率达到了 32.64% (AM 0)^[23]. 针对目前空间中常用的 GaInP/GaAs/Ge 三结电池, 天津三安光电公司与中国电子科技集团公司第十八研究所采用机械减薄和化学腐蚀的方法制备出较大面积的轻质三结太阳电池, 其效率在 30% (AM 0) 左右^[24,25]. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所采用一次低温键合转移技术制备了柔性轻质的 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池, 在 AM 1.5G 光谱下效率达到 34.68%^[14]. 随着柔性电池技术的不断突破, 电池的效率、面积尺寸等都有了明显的提升, 而良好的封装材料具有低渗透性可以保护电池免受水、氧化、灰尘等环境侵蚀以及高透光性来保证器件的工作性能和寿命^[26,27]. 选用适宜的封装材料和可靠的封装方案对柔性电池器件的设计和制造至关重要. 柔性 GaAs 太阳电池的柔性基底主要有聚酰亚胺 (polyimide, PI), 聚对苯二甲酸乙二酯 (polyethylene-terephthalate, PET) 以及本文所采用的金属薄膜等^[8,13,28], 封装材料包括轻质玻璃、Teflon 聚全氟乙丙烯 (fluorinated ethylene propylene, FEP) 膜、硅胶以及乙烯-醋酸乙烯共聚物 (ethylene-vinyl acetate copolymer, EVA) 和聚烯烃弹性体 (poly-olefin-elastomer, POE) 热熔胶等^[8,15,29].

考虑电池在实际使用过程中会长时间处于复杂环境条件下, 如昼夜交替的温度循环, 以及有水分和污染物的不良储存环境等, 这对电池材料和光电性能的稳定性提出了更加严格的要求^[30–33]. 因此, 探究柔性太阳电池在湿热和热循环环境下长时间工作的稳定性十分重要. 目前, 国外针对 III-V 多结太阳能电池的稳定性和可靠性分析主要集中在刚性 Ge, GaAs 衬底太阳电池在高温热应力条件下

的降解机制和温度加速寿命老化分析^[34–37], 而柔性 III-V 多结太阳能电池在高温高湿和热循环等复杂环境应力下的可靠性研究还很少, 现阶段有将 III-V 多结太阳电池转移至 PI 和 PET 薄膜柔性基底之上^[13,28], 再通过多样的封装材料和封装技术对电池进行封装后, 验证电池组件的稳定性和可靠性. 但研究中均没有对柔性电池在环境可靠性试验中的性能变化进行细致的退化分析, 高效柔性太阳电池的环境稳定性尚不清晰, 特别是以金属薄膜作为柔性基底的太阳电池.

本文研究了封装的柔性太阳电池在湿热和热循环环境下光电性能的稳定性. 首先通过对反向外延层结构采用电镀金属薄膜、衬底腐蚀和临时键合等工艺步骤成功制备了未封装柔性双结 GaInP/GaAs 太阳电池, 之后将乙烯-四氟乙烯 (ethylene-tetra-fluoro-ethylene, ETFE) 薄膜材料和 EVA 热熔胶与焊接后的柔性电池进行层压封装获得了性能良好的柔性封装太阳电池. 对封装好的电池器件进行湿热试验和冷热循环试验探究电池性能的稳定性, 结果表明封装柔性双结电池的短路电流密度 (J_{sc})、开路电压 (V_{oc})、填充因子 (FF) 和效率 (E_{ff}) 等电学参数均未发生明显的退化, 证明了我们制备的柔性封装电池在未来规模应用的可行性, 同时对湿热试验中 V_{oc} 的微降进行了暗态分析与光态电学仿真探究更深入的退化原因.

2 实验

反向倒置双结 GaInP/GaAs 太阳电池采用有机金属气相沉积 (MOCVD) 在 GaAs 衬底上沉积晶格匹配的 GaInP 和 GaAs 子电池, 子电池之间通过薄的隧道结连接, 以允许隧道机制主导的多数载流子的运输^[38], 它们彼此堆叠在一起形成串联^[39]. 具体的堆叠结构示意图如图 1(a) 所示. 在反向外延层上进行 p 型电极蒸镀、电镀铜薄膜、键合玻璃临时衬底、腐蚀原有 GaAs 衬底等其他工艺步骤得到有效的柔性太阳电池器件, 简易流程图在图 1(b) 中展示, 详细的制备方法见 Long 等^[14], Sun 等^[40], Long 等^[41] 和 Chen 等^[42] 的研究.

采用电阻焊方法将得到的未封装电池的正背面电极分别与厚度约为 20 μm 的银条进行焊接, 在焊接时要保持金属电极和银焊条的干净整洁, 从而提高焊接质量. 为了保障太阳电池稳定、安全、

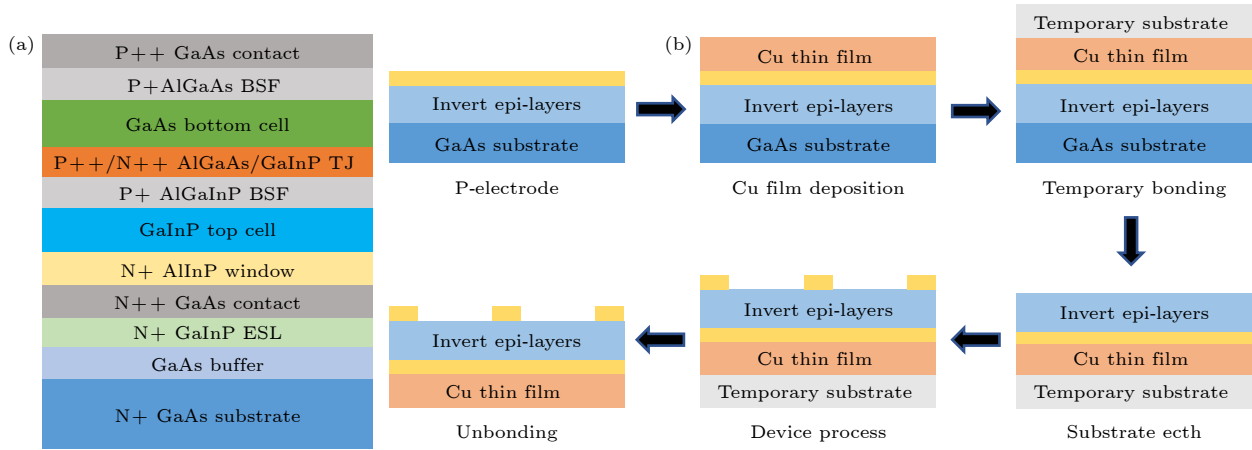


图 1 柔性 GaInP/GaAs 薄膜太阳能电池 (a) 堆叠结构示意图; (b) 工艺流程图

Fig. 1. Flexible GaInP/GaAs thin-film solar cells: (a) Stack structure diagram; (b) process flow diagram.

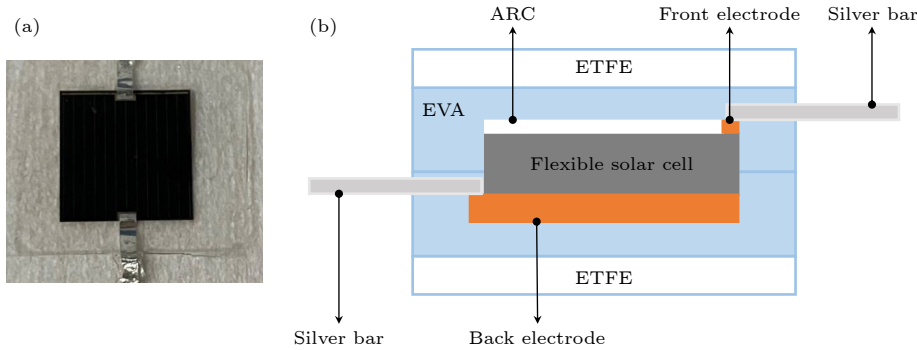


图 2 柔性 GaInP/GaAs 薄膜太阳能电池 (a) 封装实物图; (b) 封装结构示意图

Fig. 2. Flexible GaInP/GaAs thin-film solar cells: (a) Picture of real encapsulated products; (b) encapsulation structure diagram.

长期工作, 将焊接好的电池器件与前后膜 ETFE、胶膜 EVA 进行层压封装. ETFE 薄膜透光率高于 95%, 厚度为 25 μm , 可在 $-200\text{ }^\circ\text{C}$ — $150\text{ }^\circ\text{C}$ 温度环境下长时间使用, 具有耐水蒸气、抗老化、耐高温、耐腐蚀等特点, 非常适合作为封装前后膜的材料^[43]. EVA 是一种受热固化型的膜状胶材料, 具有良好的粘接力、透光性、柔韧性、耐老化性等^[44]. 图 2(a) 和图 2(b) 为封装后得到的柔性器件的实物图与封装结构示意图. 为验证器件在复杂环境条件下的工作稳定性, 将制备好的 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的封装电池放入老化试验箱中, 分别暴露在高温高湿 ($85\text{ }^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$) 和温度为 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ — $75\text{ }^\circ\text{C}$ 的冷热循环交变的环境中. 每 144 h 和 12 个循环在太阳模拟器系统下采用四探针方法测量每个电池的光态和暗态电流-电压 (I - V) 曲线以便对太阳电池的退化有一个良好的跟踪. 太阳模拟器的光源为 OSRAM 1000 W 短弧氙灯, 可模拟 AM 1.5G 标准辐照度的光谱, I - V 具体测试方法见 Huang 等^[45] 的研究.

3 分析与讨论

在实验初期首先对未封装柔性双结电池进行了外量子效率 (EQE) 的光谱响应测试, 并由 (1) 式计算得到各结子电池的 J_{sc} ^[10], 其中 h 为普朗克常量, c 是真空中传播速度, q 为电子电荷, λ 为波长, 结果如图 3(a) 所示, 详细测量方法见 Long 等^[10,14] 的研究. 测试结果表明由上述制备工艺流程得到的未封装柔性 GaInP/GaAs 太阳能电池具有良好的光电特性, 为电池后续的封装工作奠定了基础.

$$J_{\text{sc}} = \frac{q\lambda}{hc} \int_0^\infty \varphi_{\text{EQE}}(\lambda) \cdot \varphi_{\text{spec}}(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

封装前后的柔性 GaInP/GaAs 薄膜太阳能电池在标准空气质量 1.5G (AM 1.5G) 太阳模拟器下的电流密度-电压 (J - V) 特性曲线如图 3(b) 所示, 插表给出了封装前后电池在 AM 1.5G 光谱下 J_{sc} , V_{oc} , FF 和 E_{ff} 等电学参数. 两结电池的 V_{oc} 达到了 2.4 V 以上. 此外, 从结果中可以看出, 封装之后电

池组件的 J_{sc} 有所下降, 这主要是由于胶膜的透光度无法达到 100%. 而 V_{oc} 的轻微下降则与焊接时引入的微损伤有关, 但封装后的柔性太阳电池整体电学性能保持良好, 封装后电池的重量面密度约为 405 g/m^2 .

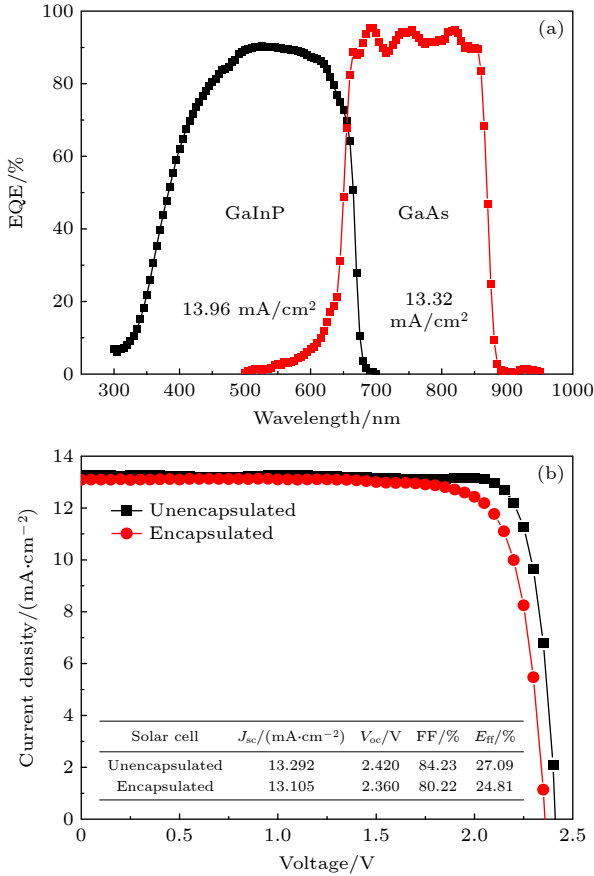


图 3 (a) 未封装柔性电池 EQE 特性曲线; (b) 封装前后柔性 GaInP/GaAs 薄膜太阳电池在 AM 1.5G 光谱下的 $J-V$ 特性曲线

Fig. 3. (a) EQE curves of unencapsulated flexible solar cell; (b) $J-V$ characteristic curves of flexible GaInP/GaAs thin-film solar cells under AM 1.5G spectra before and after encapsulation.

湿热试验的主要目的是想探究封装胶膜能否阻挡水蒸气对电池起到保护作用, 而冷热循环试验主要目的是为了验证焊点强度能否承受高低温冷热循环交替的变化. 为了验证封装胶膜对未封装电池的保护作用, 对未封装电池进行了 $85 \text{ }^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$ 湿热试验. 由于 $J-V$ 曲线与横坐标交点处斜率绝对值可以大致得出太阳电池的串联电阻, 通过图 4 柔性未封装双结电池在湿热实验下的 $J-V$ 曲线测试结果不难发现随着湿热时间增长, 未封装电池的 $J-V$ 曲线在开路状态附近的斜率绝对值不断减小,

串联电阻的增加量变大 ($\Delta R_s \approx 4.4 \text{ } \Omega$), 这与未封装电池在老化试验中出现金属细栅脱落从而使得金属和半导体之间的欧姆接触变差有关, 同时也引发了 FF 和 E_{ff} 下降.

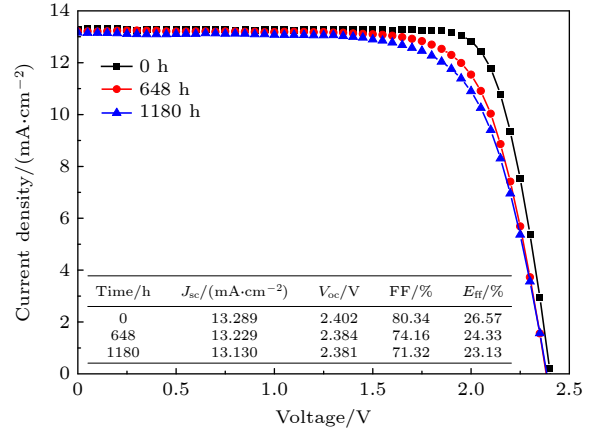


图 4 柔性未封装 GaInP/GaAs 太阳电池 $85 \text{ }^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$ 湿热试验后在 AM 1.5G 光谱下的 $J-V$ 特性曲线, 插图为相应的电学性能测试结果

Fig. 4. $J-V$ characteristic curves under the AM 1.5G spectrum of unencapsulated flexible GaInP/GaAs solar cell after damp heat test at $85 \text{ }^\circ\text{C}$ and $85\% \text{ RH}$, the inserted tables are the absolute values of performance parameters.

图 5(a) 和图 5(b) 分别为柔性封装 GaInP/GaAs 薄膜电池在 $85 \text{ }^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$ 湿热试验 0, 464, 1112 h 和 $-60 \text{ }^\circ\text{C}-75 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷热循环试验 0, 60 和 108 cycle 后在 AM 1.5G 光谱下的 $J-V$ 特性曲线, 插图表格中总结了对应的电学性能参数的变化情况. 此外, 图 5(c) 和图 5(d) 分别展示了在长达 1112 h 的湿热试验和 108 次冷热循环试验下的电学性能参数随老化时间的归一化变化. 由图 5 插入的表可以发现, 柔性封装 GaInP/GaAs 太阳电池在长时间的湿热和冷热循环试验下电学性能没有明显下降, 性能保持十分稳定, 从而验证了封装胶膜具有一定阻挡水蒸气的能力, 且焊点强度具有承受长期高低温冷热循环交替应变的能力.

仔细观察实验现象, 可以发现湿热试验中封装电池的电学性能还是存在轻微下降的趋势. 由于长时间的湿热试验使电池长期暴露在高温和湿气环境当中, 高温和水汽对电池性能的影响更加显著, 导致后期测试 J_{sc} 和 E_{ff} 都出现了下降的现象, 但 V_{oc} 的轻微下降则直接反映了电池材料本身的性质 ($\Delta V_{oc} \approx 0.023 \text{ V}$). 为了更进一步了解 V_{oc} 轻微下降的原因, 对电池进行了暗态分析.

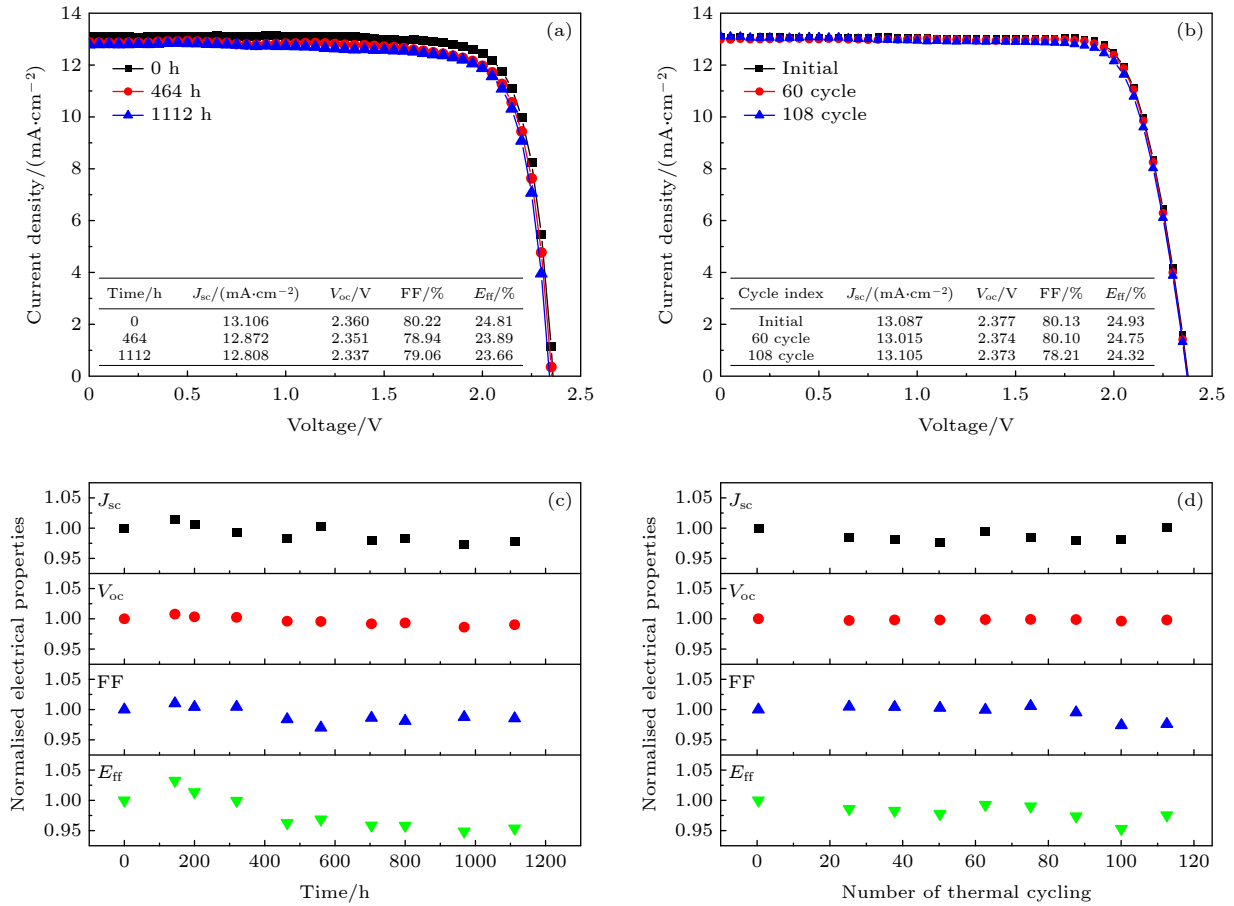


图5 柔性封装 GaInP/GaAs 薄膜太阳能电池 (a) 85 °C/85% RH 湿热试验; (b) -60 °C—75 °C 冷热循环试验后在 AM 1.5G 光谱下的 J - V 特性曲线, 图中插入的表格为相应的电学性能测试结果; (c), (d) 在长期湿热和冷热循环试验下的短路电流密度 (J_{sc})、开路电压 (V_{oc})、填充因子 (FF) 和效率 (E_{ff}) 电学性能参数随老化时间的归一化变化

Fig. 5. J - V characteristic curves under the AM 1.5G spectra of encapsulated flexible GaInP/GaAs solar cells after: (a) Damp heat test at 85 °C and 85% RH; (b) thermal cycling test between -60 °C to 75 °C, the inserted tables are the absolute values of performance parameters; (c), (d) normalized electrical properties of J_{sc} , V_{oc} , FF, and E_{ff} under long-term damp heat test (c) and thermal cycling test (d).

图6 显示了柔性封装电池在湿热试验 0, 464, 1112 h 后的暗 I - V 曲线. 采用双二极管模型分析了复合和扩散过程的暗 I - V 特性. 太阳能电池的正向 I - V 曲线可以用双指数表达式^[46,47] 表示为

$$I(V) = I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right] - 1 \right\} + I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

其中 I_{01} , I_{02} 为二极管饱和电流; n_1 , n_2 为理想因子; q 为电子电荷; k 为玻尔兹曼常数; T 是温度; R_s 和 R_{sh} 分别为串联和并联电阻. 在此不讨论 R_s 和 R_{sh} 的影响, 双二极管模型的等效电路可分为两个主要区域, 其中区域 I 为耗尽区内的复合电流, 区域 II 为扩散电流, 分别对应式中的前两项. 理论计算单结太阳能电池的理想因子 $n_1 = 2$, 考虑了不同

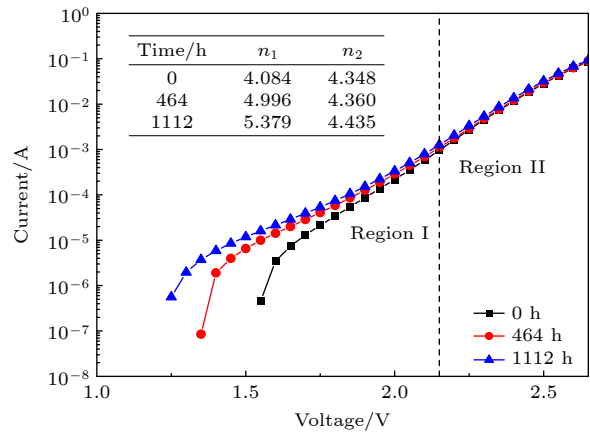


图6 柔性封装 GaInP/GaAs 薄膜太阳能电池湿热实验后的暗 I - V 曲线, 表格中为计算得到的理想因子 n_1 和 n_2

Fig. 6. Dark I - V curves of encapsulated flexible GaInP/GaAs solar cells after damp heat test, the inserted tables are the calculated ideality factors n_1 and n_2 .

的复合机制; $n_2 = 1$ 表示室温下太阳能电池内部的扩散过程^[46]. 由于双结电池是由两个独立的子电池串联而成, 因此由双结电池暗 $I-V$ 曲线计算得到的 n_1 和 n_2 并不等于 2 和 1, 其结果是由两个子电池的共同作用所得到^[48], 可近似认为是两个子电池理想因子的加和.

图 6 表格给出了不同湿热时间理想因子的数值变化情况, 总的变化情况为 $\Delta n_1 = 1.295$, $\Delta n_2 = 0.087$. 从结果来看, $\Delta n_1 \gg \Delta n_2$, 其对应由复合机制影响的并联电阻变低更多, V_{oc} 的轻微下降与复合增强密切相关. 由于电池长期放置在高温高湿环境中, 在较高温度下, 电池材料极易引入晶格缺陷和表面缺陷作为载流子复合中心, 加速载流子的复合, 从而减小电池的并联电阻, 少子寿命随复合中心的增加而缩短, 导致反向饱和电流增大致使 V_{oc} 出现轻微降低^[49,50].

由上述暗态分析发现, 复合增强导致反向饱和电流增大与光态下 $J-V$ 曲线中 V_{oc} 的轻微下降相关. 通过电学仿真可以进一步验证上述分析结果. 图 7 为双结电池的等效电路图^[51], 由上到下分别代表 GaInP, GaAs 子电池层, 串联电阻 $R_s = 3 \Omega$, 仿真的其他参数初始值在表 1 中给出, 由初始参数值模拟得到的仿真结果为图 8 中的曲线①. 在仿真中, 通过增大各结子电池中代表复合机制的反向饱和电流 $I_{01-GaInP}$ 和 $I_{01-GaAs}$ 来实现 V_{oc} 的减小, 模拟得到的 $I-V$ 曲线见图 8 中的曲线②, 图 8 中插入的表格给出了仿真中各结子电池采用的 I_{01} 反向饱

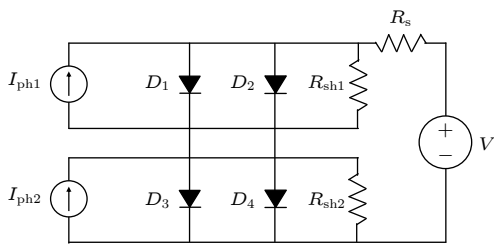


图 7 双结太阳能电池等效电路图

Fig. 7. Equivalent circuit diagram of a double-junction solar cell.

表 1 仿真参数初始设置值

Table 1. Initial setting values of the simulation parameters.

Parameter	$I_{ph}/$ mA	$I_{01}/$ (10^{-17} A)	$I_{02}/$ (10^{-25} A)	n_1 n_2	$R_{sh}/$ ($10^5 \Omega$)
GaInP	13.96	2.09	4.3	2 1	1
GaAs	13.00	345	1.2×10^5	2 1	1

和电流的数值以及仿真得到的 V_{oc} 的数值结果. 从仿真结果可以看出由于复合增强, 反向饱和电流增大会导致 V_{oc} 的轻微下降, 由最初的 2.415 V 降至 2.399 V.

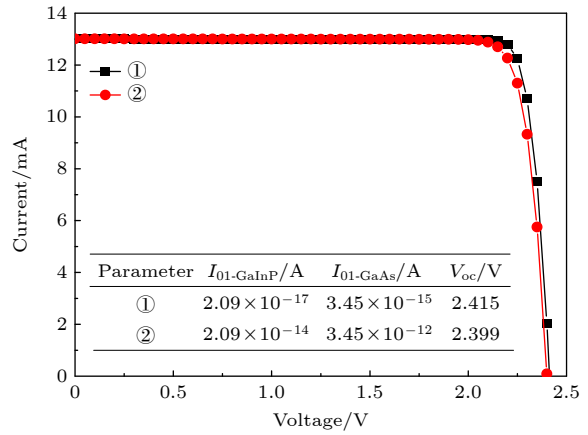


图 8 $I-V$ 曲线模拟结果, 表格中为仿真各结子电池采用的反向饱和电流 I_{01} 数值及仿真得到的 V_{oc} 数值

Fig. 8. Simulation results of the $I-V$ curves, the inserted table are the reverse saturation current I_{01} adopted in the simulation of each subcell and the V_{oc} obtained by simulation.

4 结 论

为了评估柔性封装 GaInP/GaAs 薄膜太阳能电池在恶劣环境条件下的稳定性, 分别进行了湿热和冷热循环试验. 试验后, 该薄膜电池的性能几乎没有下降, 封装电池性能稳定, 表明实验采取的封装方案可行, 封装胶膜具有较好的阻隔水蒸气的能力, 且焊点的焊接强度具有承受长期高低温循环交替应变的能力. 在实验过程中还发现了长期湿热试验下代表复合机制的理想因子明显增大, 这说明在老化环境中引入了更多复合中心, 使少子寿命缩短, 反向饱和电流增大导致 V_{oc} 的轻微下降. 此外, 在双结电池二极管模型的电学仿真中, 通过增大代表复合的反向饱和电流 I_{01} 也得到 V_{oc} 微降的仿真结果, 进一步印证了老化试验中的复合增强与开压下降密切相关.

参考文献

[1] Green M A, Dunlop E D, Hohl-Ebinger J, Yoshita M, Kopidakis N, Bothe K, Hinken D, Rauer M, Hao X 2022 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **30** 687
 [2] Takamoto T, Kodama T, Yamaguchi H, Agui T, Takahashi N, Washio H, Hisamatsu T, Kaneiwa M, Okamoto K, Imaizumi M, Kibe K 2006 *Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Waikoloa, HI,

- USA, May 7–12, 2006 p1769
- [3] Imaizumi M, Nakamura T, Takamoto T, Ohshima T, Tajima M 2017 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **25** 161
- [4] Imaizumi M, Takamoto T, Sugimoto H, Ohshima T, Kawakita S 2019 *Proceedings of the IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference* Chicago, IL, USA, June 16–21, 2019 p1495
- [5] Park S, Bourgoin J C, Sim H, Baur C, Khorenko V, Cavani O, Bourcois J, Picard S, Boizot B 2018 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **26** 778
- [6] Raya-Armenta J M, Bazmohammadi N, Vasquez J C, Guerrero J M 2021 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **233** 111379
- [7] Kawakita S, Imaizumi M, Makita K, Nishinaga J, Sugaya T, Shibata H, Sato S I, Ohshima T 2016 *Proceedings of the 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Portland, OR, USA, June 5–10, 2016 p2574
- [8] Takamoto T, Washio H, Juso H 2014 *Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Denver, CO, USA, June 8–13, 2014 p1
- [9] Samberg J P, Zachary Carlin C, Bradshaw G K, Colter P C, Harmon J L, Allen J B, Hauser J R, Bedair S M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 103503
- [10] Long J, Wu D, Huang X, Ye S, Li X, Ji L, Sun Q, Song M, Xing Z, Lu S 2021 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **29** 181
- [11] Geisz J F, Kurtz S, Wanlass M W, Ward J S, Duda A, Friedman D J, Olson J M, McMahon W E, Moriarty T E, Kiehl J T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 023502
- [12] Schön J, Bissels G M M W, Mulder P, van Leest R H, Gruginskie N, Vlieg E, Chojniak D, Lackner D 2022 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **30** 1003
- [13] Shoji Y, Makita K, Sugaya T 2020 *Jpn. J. Appl. Phys.* **59** 052003
- [14] Long J, Li X, Sun Q, Dai P, Zhang Y, Xuan J, Chen F, Song M, Honda S, Uchida S, Lu S 2021 *Sol. RRL* **5** 2100066
- [15] Xuan J, Long J, Sun Q, Zhang Y, Li X, Wang X, Chen Z, Wu X, Lu S 2022 *Sol. RRL* **6** 2200371
- [16] van Riesen S, Bett A W 2005 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **13** 369
- [17] King R R, Fetzer C M, Colter P C, Edmondson K M, Law D C, Stavrides A P, Yoon H, Kinsey G S, Cotal H L, Ermer J H, Sherif R A, Emery K, Metzger W, Ahrenkiel R K, Karam N H 2003 *Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Osaka, Japan, May 11–18, 2003 p622
- [18] Kurtz S R, Olson J M, Kibbler A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1922
- [19] Steiner M A, France R M, Buencuerpo J, Geisz J F, Nielsen M P, Pusch A, Olavarria W J, Young M, Ekins-Daukes N J 2020 *Adv. Energy Mater.* **11** 2002874
- [20] France R M, Geisz J F, Song T, Olavarria W, Young M, Kibbler A, Steiner M A 2022 *Joule* **6** 1121
- [21] Sasaki K, Agui T, Nakaido K, Takahashi N, Onitsuka R, Takamoto T 2013 *Proceedings of the 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV)* Miyazaki, Japan, April 15–17, 2013 p22
- [22] Kayes B M, Zhang L, Twist R, Ding I K, Higashi G S 2014 *IEEE J. Photovoltaics* **4** 729
- [23] Zhang Y, Shan Z F, Cai J J, Wu H Q, Li J C, Chen K X, Lin Z W, Wang X W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 158802 (in Chinese) [张永, 单智发, 蔡建九, 吴洪清, 李俊承, 陈凯轩, 林志伟, 王向武 2013 *物理学报* **62** 158802]
- [24] Wang D X, Li M Y, Bi J F, Li S L, Liu G Z, Song M H, Wu C Y, Chen W J 2017 *Chin. J. Lumin.* **38** 1217 (in Chinese) [王笃祥, 李明阳, 毕京锋, 李森林, 刘冠洲, 宋明辉, 吴超瑜, 陈文浚 2017 *发光学报* **38** 1217]
- [25] Tie J R, Li X D, Sun X P 2018 *Chin. J. Power Sources* **42** 1174 (in Chinese) [铁剑锐, 李晓东, 孙希鹏 2018 *电源技术* **42** 1174]
- [26] Kim T S, Kim H J, Geum D M, Han J H, Kim I S, Hong N, Ryu G H, Kang J, Choi W J, Yu K J 2021 *ACS Appl. Mater. Interface* **13** 13248
- [27] Raj V, Haggren T, Wong W W, Tan H H, Jagadish C 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 143002
- [28] Yang J K, Jiao X Y, Yang Y, Wang X S, Song L L, Xue J, Chen Z C 2019 *Proceedings of the Proceedings of the 6th China High Resolution Earth Observation Conference (CHREOC 2019)* Chengdu, China, September 1, 2020 p385
- [29] Drees M, Stender C L, Chan R, Osowski M, Pan N 2020 *Proceedings of the 2020 IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* Virtual Meeting, June 15–August 21, 2020 p1283
- [30] Hong H F, Huang T S, Uen W Y, Chen Y Y 2014 *J. Nanomater.* **2014** 1
- [31] Mekhilef S, Saidur R, Kamalifarvestani M 2012 *Renewable Sustainable Energy Rev.* **16** 2920
- [32] Faye I, Ndiaye A, Gecke R, Blieske U, Kobor D, Camara M 2019 *Sol. Energy* **191** 161
- [33] Khan F, Kim J H 2019 *Materials (Basel)* **12** 4047
- [34] Orlando V, Gabás M, Galiana B, Espinet-González P, Palanco S, Nuñez N, Vázquez M, Araki K, Algora C 2017 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **25** 97
- [35] Orlando V, Lombardero I, Gabás M, Nuñez N, Vázquez M, Espinet-González P, Bautista J, Romero R, Algora C 2019 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **28** 148
- [36] Nuñez N, Vázquez M, Barrutia L, Bautista J, Lombardero I, Zamorano J C, Hinojosa M, Gabas M, Algora C 2021 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **230** 111211
- [37] Espinet-González P, Algora C, Nuñez N, Orlando V, Vázquez M, Bautista J, Araki K 2015 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **23** 559
- [38] Bauhuis G J, Mulder P, Schermer J J 2014 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **22** 656
- [39] Wanlass M, Ahrenkiel P, Albin D, Carapella J, Duda A, Emery K, Friedman D, Geisz J, Jones K, Kibbler A, Kiehl J, Kurtz S, McMahon W, Moriarty T, Olson J, Ptak A, Romero M, Ward S 2006 *Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Waikoloa, HI, USA, May 7–12, 2006 p729
- [40] Sun Q, Long J, Li X, Dai P, Zhang Y, Xuan J, Wang X, Chen Z, Wu X, Lu S 2022 *IEEE Electron Device Lett.* **43** 584
- [41] Long J, Xiao M, Huang X, Xing Z, Li X, Dai P, Tan M, Wu Y, Song M, Lu S 2019 *J. Cryst. Growth* **513** 38
- [42] Chen Z, Long J, Sun Q, Wang X, Wu X, Li X, Yu M, Luo X, Zhao H, Fu Y, Lu S 2022 *Adv. Energy Sustainability Res.* **4** 2200136
- [43] Guo Y G, Li Y Y, Zuo Y, Lu B, Yang Z Y 2022 *Synth. Mater. Aging Appl.* **51** 51 (in Chinese) [郭永刚, 李媛媛, 左燕, 卢博, 杨增英 2022 *合成材料老化与应用* **51** 51]
- [44] Ding S, Zhang H P 2021 *Adhesion* **45** 32 (in Chinese) [丁盛, 张海鹏 2021 *粘接* **45** 32]
- [45] Huang X, Long J, Wu D, et al. 2020 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **208** 110398
- [46] Hussein R, Borchert D, Grabosch G, Fahrner W R 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **69** 123
- [47] Yue L, Wu Y Y, Zhang Y Q, Hu J M, Sun C Y, Hao M M, Lan M J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 188101 (in Chinese) [岳龙, 吴宜勇, 张延清, 胡建民, 孙承月, 郝明明, 兰慕杰 2014 *物理学报* **63** 188101]
- [48] Braun A, Szabó N, Schwarzburg K, Hannappel T, Katz E A, Gordon J M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 223506
- [49] van Dyk E E, Meyer E L 2004 *Renewable Energy* **29** 333
- [50] Qi J H, Hu J M, Sheng Y H, Wu Y Y, Xu J W, Wang Y Y,

Yang X M, Zhang Z R, Zhou Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 108802 (in Chinese) [齐佳红, 胡建民, 盛延辉, 吴宜勇, 徐建文, 王月媛, 杨晓明, 张子锐, 周扬 2015 物理学报 **64** 108802]

[51] Xiao W B, Liu W Q, Wu H M, Zhang H M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 198801 (in Chinese) [肖文波, 刘伟庆, 吴华明, 张华明 2018 物理学报 **67** 198801]

Study of flexible packing and stability of GaInP/GaAs solar cells*

Wu Xiao-Xu¹⁾ Long Jun-Hua^{2)†} Sun Qiang-Jian¹⁾ Wang Xia¹⁾

Chen Zhi-Tao²⁾ Yu Meng-Lu¹⁾ Luo Xiao-Long²⁾

Li Xue-Fei²⁾ Zhao Hu-Yin¹⁾ Lu Shu-Long^{2)‡}

1) (School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2) (Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

(Received 9 March 2023; revised manuscript received 28 April 2023)

Abstract

Flexible III-V thin-film solar cells are usually used as space power supply in spacecrafts. In practical applications, suitable encapsulated materials can protect the cells from being affected by environmental factors such as moisture, oxidation and pollutants. Therefore, it is critical to explore suitable flexible encapsulation schemes and long-term stability of solar cell performance. In this paper, the prepared flexible GaInP/GaAs solar cells are welded by resistance welding, and then laminated with polymer encapsulation thin films and hot melt adhesives with high light transmission. After being encapsulated, the flexible two-junction solar cell achieves good electrical performance ($J_{sc} = 13.105 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $V_{oc} = 2.360 \text{ V}$), the photoelectric conversion efficiency can reach 24.81%, and the weight density is about 405 g/m^2 . The performance stability and environmental tolerance of the encapsulated flexible GaInP/GaAs solar cells under complex storage conditions are investigated. The results show that the encapsulated flexible solar cells still maintain good stability after $85 \text{ }^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$ damp heat has been tested for more than 1000 h and 108 cycles of thermal cycling test between $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ and $75 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. It also proves that the encapsulated technology adopted in this experiment is feasible and has an excellent protective effect on the double-junction solar cells. However, there is a slight decrease in the open-circuit voltage in the long-term damp heat test ($\Delta V_{oc} \approx 0.023 \text{ V}$), which may reflect the change of the solar cell itself. By further extracting the changes of the ideal factors n_1 and n_2 representing the recombination mechanism and diffusion mechanism respectively from the dark $I-V$ curves ($\Delta n_1 = 1.295$, $\Delta n_2 = 0.087$), it can be found that the slight drop of open-circuit voltage is closely related to the recombination enhancement ($\Delta n_1 \gg \Delta n_2$). In the long-term high temperature and humidity environment, it is easy to introduce defects in the material of the solar cells, serving as the carrier recombination centers, thus accelerating the carrier recombination, reducing the parallel resistance, shortening the minority carrier lifetime, and increasing the reverse saturation current resulting in a slight drop in the open-circuit voltage. In addition, the electrical simulation results based on the diode-model indicate that the change in the performance of the solar cells after flexible encapsulation is due to the enhanced carrier recombination under damp heat test, which reduces the open-circuit voltage.

Keywords: GaAs thin-film solar cells, multi-junction solar cells, flexible encapsulation, reliability

PACS: 88.40.jm, 88.40.jp, 88.40.ff, 88.40.fc

DOI: 10.7498/aps.72.20230352

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61827823, 62274176), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20220292), the Science and Technology Program of Suzhou, China (Grant No. SYC2022123), and the Program from SINANO, China (Grant No. Y4JAQ21005).

† Corresponding author. E-mail: jhlong2017@sinano.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: sllu2008@sinano.ac.cn

GaInP/GaAs太阳电池的柔性封装及稳定性

吴晓旭 龙军华 孙强健 王霞 陈志韬 于梦璐 罗骁龙 李雪飞 赵沪隐 陆书龙

Study of flexible packing and stability of GaInP/GaAs solar cells

Wu Xiao-Xu Long Jun-Hua Sun Qiang-Jian Wang Xia Chen Zhi-Tao Yu Meng-Lu Luo Xiao-Long
Li Xue-Fei Zhao Hu-Yin Lu Shu-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 138803 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230352

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230352>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池不同能量质子辐照损伤模拟

Modeling and simulating of radiation effects on the performance degradation of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells induced by different energy protons

物理学报. 2020, 69(9): 098802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191878>

高效硒化锑薄膜太阳电池中的渐变能隙结构

Bandgap grading of $\text{Sb}_2(\text{S},\text{Se})_3$ for high-efficiency thin-film solar cells

物理学报. 2021, 70(12): 128802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202016>

硒化锑薄膜太阳电池的模拟与结构优化研究

Simulation and optimal design of antimony selenide thin film solar cells

物理学报. 2018, 67(24): 247301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181745>

钙钛矿太阳电池中各功能层的光辐照稳定性研究进展

Research progress of light irradiation stability of functional layers in perovskite solar cells

物理学报. 2021, 70(9): 098402 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201762>

宽带隙钙钛矿材料及太阳电池的研究进展

Research progress of wide bandgap perovskite materials and solar cells

物理学报. 2020, 69(20): 207401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200822>

空间太阳电池阵应变规律研究

Strain-testing research of space solar cell array

物理学报. 2021, 70(19): 198801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210320>