

倒置 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳能电池失效分析

张怡¹, 龙军华^{2*}, 孙强健¹, 宣静静¹, 李雪飞², 王霞¹, 陈志韬², 吴晓旭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, 安徽 合肥 230026;²中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123

摘要 利用衬底剥离和临时键合技术制备了倒置 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳能电池并研究了其可靠性。通过温度为 85 °C、相对湿度为 85% 环境下的可靠性测试发现,当湿热实验进行至 144 h 时三结电池的初始光电转换效率从 31.86% 急剧下降到了 24.84%。随着实验时间的继续增加,太阳能电池性能相对稳定。外量子效率和电致发光光谱测试结果表明,三结电池性能的退化主要来自 GaInP 顶电池。在高温、高湿环境下,AlInP 窗口层中元素含量分布发生变化,导致材料对 340~480 nm 波段的反射率提高,此外高含量 Al 元素的聚集导致顶电池缺陷密度增加,引起 GaInP 顶电池载流子收集效率下降,从而限制了三结太阳能电池的整体性能。二次离子质谱的结果也直观地证明了这种现象。该研究结果证明了 AlInP 窗口层对多结太阳能电池环境稳定性有重要影响。

关键词 材料; 光伏; GaAs 太阳能电池; 可靠性; 湿热实验; AlInP 窗口层

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2016001

Analysis of Inverted GaInP/GaAs/InGaAs Triple-Junction Solar Cell Failure

Zhang Yi¹, Long Junhua^{2*}, Sun Qiangjian¹, Xuan Jingjing¹, Li Xuefei², Wang Xia¹,
Chen Zhitao², Wu Xiaoxu¹, Lu Shulong^{2**}¹School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;²Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, Jiangsu, China

Abstract Inverted GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells are fabricated by substrate lift-off and temporary bonding techniques, and their reliability is investigated. The reliability test in an environment with a temperature of 85 °C and a relative humidity of 85% finds that the initial photoelectric conversion efficiency of the triple-junction cells drops sharply from 31.86% to 24.84% when the damp heat test is performed for 144 h. As the test time increases, the solar cell performance is relatively stable. External quantum efficiency and electroluminescence spectroscopy tests show that the degradation of the triple-junction cell performance mainly comes from the GaInP top cell. Under the high temperature and high humidity environment, the distribution of the element concent in the AlInP window layer changes, which results in the enhanced spectral reflectance of the material in the range from 340 nm to 480 nm. In addition, the aggregation of the high-concent Al element leads to an increase in the defect density of the top cell and a decrease in the carrier's collection efficiency of the GaInP top cell, which thus limits the overall performance of triple-junction solar cells. The results of secondary ion mass spectrometry (SIMS) also visually demonstrate this phenomenon. The results of this study prove that the AlInP window layer has an important impact on the environmental stability of multi-junction solar cells.

Key words materials; photovoltage; GaAs solar cell; reliability; damp heat test; AlInP window layer

1 引言

III-V 族化合物多结太阳能电池的高效率、高可靠性

和长寿命已经在空间电力系统中得到验证。与传统外延生长的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池相比^[1-2], 基于倒置结构的失配多结 (IMM) 太阳能电池取得了非

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-15; 录用日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61774165, 61704186, 61827823)、SINANO 计划(Y8AAQ11003, Y4JAQ21005)

通信作者: *jhlou2017@sinano.ac.cn; **slu2008@sinano.ac.cn

常好的成果,如三结^[3-7]、四结^[8-9]甚至六结^[10]太阳能电池。因此,IMM太阳能电池成为未来能源领域发展的一个重要方向^[11]。GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳能电池的规模化制备技术已经趋于成熟^[12-13],其具有更大带隙的底部电池,功率质量比较大,有望应用到空间能源系统。为了满足实际环境中应用的需求,太阳能电池器件的可靠性受到了极大的关注,在实现较高光电转换效率的同时能够在恶劣环境下保持长期稳定的性能是未来研究的关键^[14-16]。在实际应用中,材料腐蚀、水蒸气侵蚀、温度变化、紫外线辐射和机械损伤都是导致太阳能电池效率降低甚至失效的因素^[17-21]。其中,温度和湿度是影响太阳能电池性能的两个主要环境因素^[22-23]。在这些测试中,湿热实验(温度为85℃,相对湿度为85%)可以对太阳能电池在高温、高湿环境下的可靠性进行有效的验证^[24]。未封装的GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳能电池在湿热条件下的可靠性是实际环境应用的先决条件,但目前关于这方面的研究很少。本课题组前期进行了GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳能电池的相关工艺研究和器件制备,已经可以实现34.68%的光电转换效率^[25-26]。为了推动实际应用,需进一步设计可靠性实验。

本文中使用的衬底剥离和临时键合工艺成功制备了GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳能电池。所制备的三结太阳能电池器件的电流密度在湿热实验期间出现大幅度降低的现象。对此,进行了外量子效率(EQE)和电致发光(EL)测试,发现退化主要来自GaInP顶电池的AlInP窗口层,并且二次离子质谱(SIMS)的测试结果证实了这一结论。

2 实验

采用有机金属化学气相沉积法(MOCVD)在(100)偏向<111>A9°斜切角的13.33 cm GaAs衬底上直接生长了薄膜IMM GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳

电池^[27],并通过AlInGaAs组分步进缓冲层来释放InGaAs子电池和GaAs衬底之间的失配应力。本文通过设计GaInP刻蚀阻挡层(ESL)来实现太阳能电池外延层的快速剥离,采用AlInP作为GaInP顶电池的窗口层、GaAs作为接触层、重掺杂的AlGaAs/GaInP异质结作为隧道结,具体结构示意图如图1(a)所示。图1(a)中BSF为背表面场,TJ为隧穿结,SC为太阳能电池。在通过倒置直接生长获得太阳能电池的外延层以后,需要进行多步工艺将其制备成完整的太阳能电池器件,图1(b)为三结太阳能电池的制备流程。由于太阳能电池外延材料采用倒置生长方式制备,所以首先采用电子束蒸发在P型接触层上制备了背面金属电极Ti/Pt/Au。值得注意的是在蒸镀金属之前,不仅需要有机溶剂清洗样品,还需要使用酸性溶剂HCl:H₂O来去除样品表面的氧化物,以促进蒸镀过程中样品与金属之间的黏附性。之后将样品置于420℃的氮气氛围中进行快速退火合金化,形成良好的欧姆接触。IMM太阳能电池必须通过转移外延层并移除生长衬底才能获得正常的器件。采用苯并环丁烯(BCB)黏合剂将外延层键合到GaAs衬底上,确保键合界面紧密接触。在进行下一步工艺之前,需要通过石蜡将玻璃片与键合得到的GaAs衬底临时键合在一起,形成对键合GaAs衬底的正面保护。将样品置于NH₃·H₂O和H₂O₂的混合溶液中,通过搅拌对GaAs生长衬底进行快速剥离,GaAs生长衬底剥离后暴露出的GaInP刻蚀阻挡层采用HCl和H₃PO₄的混合溶液进行去除。通过电子束蒸发在N型GaAs接触层上蒸镀AuGe/Ni/Au材料,制备成正面电极,GaAs接触层采用柠檬酸和H₂O₂的混合溶液进行刻蚀。采用对III-V族半导体材料没有选择性的HBr溶液对13.33 cm外延片上有源区之外的部分进行刻蚀,实现单个器件的隔离。最后在太阳能电池表面制备Ti₃O₅和SiO₂双层抗反射涂层以提高太阳能电池的光电性能。

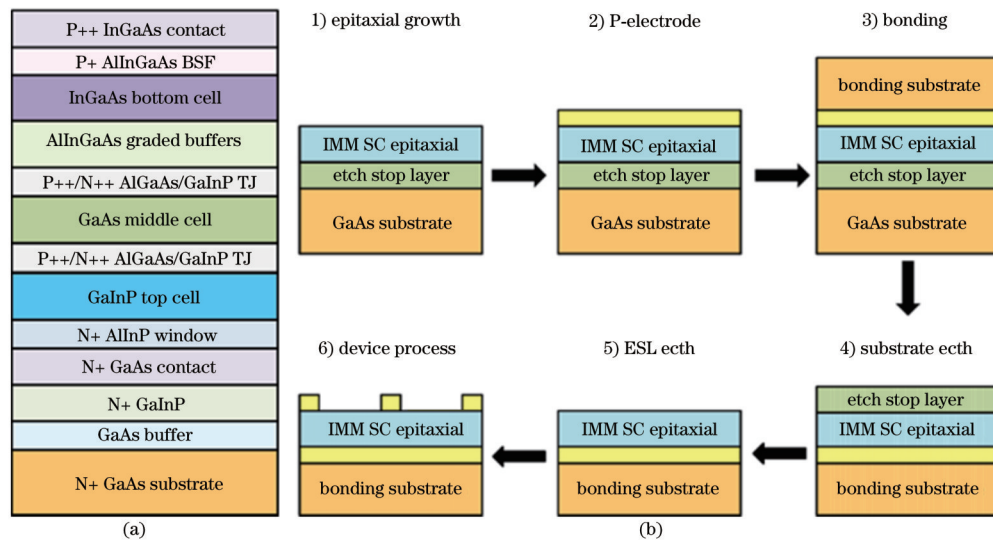


图1 GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳能电池。(a)结构示意图;(b)工艺流程图

Fig. 1 GaInP/GaAs/InGaAs triple junction solar cell. (a) Structure schematic diagram; (b) process flow diagram

本文利用恒温恒湿实验箱实现对高温、高湿环境的模拟,实验参数设置为:温度为 85 °C,相对湿度为 85%。将裸露的、未封装的太阳电池置于恒温恒湿实验箱内进行湿热实验,实验过程中定期将太阳电池取出,置于室温下恢复 2 h 后,在太阳模拟器系统下采用四线法测量其光电转换效率、开路电压、短路电流密度及填充因子^[28]。太阳模拟器的光源采用 OSRAM 1000W 短弧氙灯,可以模拟 AM1.5G 标准辐照度下的光谱。太阳电池的光谱响应通过外部量子效率测试来表征,详细的测量方法可参见 Long 等^[29]的研究。

3 结果与讨论

为便于实际应用,制备的太阳电池必须具有长期稳定性,通过湿热实验对太阳电池的可靠性进行了初步验证。湿热实验要求将太阳电池置于温度为 85 °C、相对湿度为 85% 的环境条件下 1000 h。本文对制备的 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池在温度为 85 °C、相对湿度为 85% 的环境下进行了 1112 h 的湿热实验,实验电池的初始光电转换效率为 31.86%,开路电压为 2.84 V,短路电流密度为 13.13 mA/cm²,填充因子为 85.58%。图 2 为 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池在湿热实验前以及进行湿热实验 144 h 后的电流密度-电压(*J-V*)曲线。当湿热实验进行至 144 h 时,太阳电池的光电转换效率下降至 24.84%,开路电压和填充因子分别为 2.84 V 和 84.88%,基本未发生变化,而短路电流密度降低到 10.31 mA/cm²。图 2 中插图显示为太阳电池的转换效率(E_{tr})、短路电流密度(J_{sc})、开路电压(V_{oc})、填充因子(F_f)相对于初始值的百分比随湿热实验时间的变化曲线。图 2 插图显示了在超过 1000 h 的湿热实验过程中, GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池的性能参数相对于初始参数变化的百分比曲线,可以发现在湿热实验的前 144 h,太阳电池的性能大幅降低,效率仅保持了初始值的 78%,实验进行 1112 h 后效率下降至 21.53%,保持初始值的 68%。在整个湿热实验过程中,太阳电池的开路电压和填充因子基本维持在稳定状态,电流密度呈现明显的下降趋势,因此 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池的光电转换效率的降低归因于短路电流密度的下降。

由于 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池光电转换效率的下降与短路电流密度的降低有关,初步怀疑太阳电池表面的双层抗反射涂层在高温、高湿环境下已经受到损伤,丧失了部分性能。为此,采用分光光度计测试了湿热实验后刚性三结太阳电池减反射膜(ARC)的反射率,并与湿热实验前进行对比,因为测试时器件表面已制备金属栅线,所以测试结果包括金属栅线的反射率,如图 3 所示。可以发现湿热实验前后太阳电池 ARC 的反射率曲线形状基本一致,说明 ARC 在高温、高湿环境下没有受到损伤,依旧保持了良好的性能;同时也发现短波范围的 ARC 反射率有所提高,因为刚性 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池的 AlInP 窗口层与 ARC 直接接触,它可以决定反射率曲

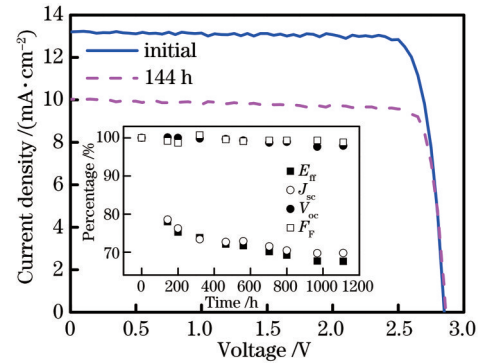


图 2 湿热实验前后 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳能电池在 AM1.5G 光谱下的 *J-V* 曲线

Fig. 2 *J-V* curves of GaInP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells under AM1.5G spectrum before and after damp heat test

线的形状和强度,所以湿热实验过程中 GaInP 顶电池的 AlInP 窗口层发生了退化,从而导致太阳电池在 340~480 nm 区域的光谱反射率提高。

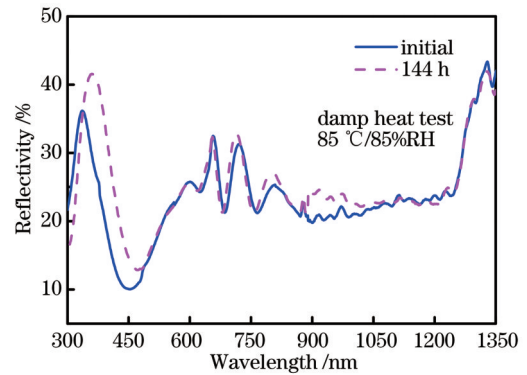


图 3 湿热实验前后三结太阳电池 Ti₃O₅/SiO₂ 双层 ARC 反射率曲线

Fig. 3 Reflectivity curves of Ti₃O₅/SiO₂ double-layer ARC of triple junction solar cells before and after damp heat test

图 4 为湿热测试前后三结太阳电池的 GaInP 子电池和 GaAs 子电池在不同注入电流密度下的 EL 发射光谱。可以发现湿热实验后 GaInP 子电池的发射峰强度相对于 GaAs 子电池明显降低,插图进一步显示了湿热实验前后 GaInP 子电池和 GaAs 子电池的电致发光(EL)发射峰强度变化。湿热实验前,当注入电流密度较小时, GaInP 子电池的 EL 发射峰强度高于 GaAs 子电池,随着注入电流密度的增大,两个子电池 EL 发射峰强度出现了反转, GaAs 子电池的 EL 发射峰强度在注入电流密度较大时逐渐高于 GaInP 子电池^[30]。但经过湿热实验后, GaInP 子电池在注入电流密度较小时, EL 发射峰强度远低于 GaAs 子电池,随着注入电流密度的增加,两者之间的峰值强度的差距进一步加大。湿热实验后 GaAs 子电池在不同注入电流密度下的 EL 发射峰强度与实验之前基本相同,表明 GaAs 子电池在实验后依旧保持稳定的性能,而 GaInP 子电池

的 EL 发射峰强度则降低一个数量级,远低于实验前的初始强度。EL 光谱的强度与太阳电池的正向注入电流密度和少数载流子的扩散长度成正比^[31-32]。在相同的正向注入电流密度下,湿热实验后三结太阳电池 GaInP 子电池的 EL 发射峰强度明显减弱,这可能是由 GaInP 子电池在高温、高湿环境中产生的缺陷所致^[33-35]。

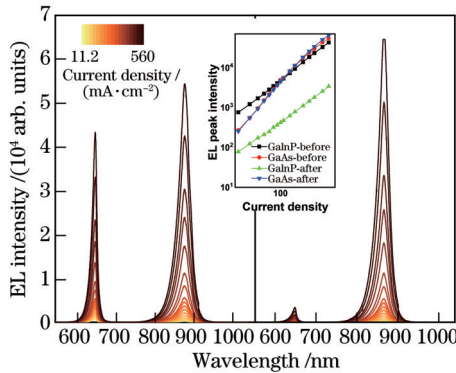


图 4 湿热实验前后不同注入电流密度下的 EL 发射光谱(插图
为湿热实验前后 EL 发射峰强度的变化)
Fig. 4 EL emission spectra under different injection current
densities before and after damp heat test (inset is change
of EL emission peak intensity before and after damp
heat test)

EQE 光谱曲线可以反映多结太阳能电池各子电池的光谱响应。图 5 显示了三结太阳电池在湿热测试前后的 EQE 光谱。可以清楚地观察到 GaAs 中部电池和 InGaAs 底部电池的 EQE 曲线没有发生明显变化,但 GaInP 顶部电池的光谱响应与湿热实验前相比严重衰减。根据太阳电池的 EQE(φ_{EQE})和 AM1.5G 光谱辐照度(φ_{spec})可以计算出单个子电池的短路电流密度(J_{sc}):

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

式中: h 是普朗克常数; c 是真空中光速常数; q 是基本电荷; λ 是波长。由公式可以计算出 GaInP、GaAs 和 InGaAs 子电池在湿热实验前的电流密度分别为 14.12 mA/cm²、14.17 mA/cm²和 13.01 mA/cm²,经实验测试后这些值为 10.37 mA/cm²、13.85 mA/cm²和 12.93 mA/cm²。湿热实验后,只有 GaInP 顶部电池的电流密度大幅度降低,这严重限制了三结太阳电池的短路电流密度。其中,短波部分电流密度下降严重,导致 EQE 曲线宽度减小,这与反射率曲线的异常波长范围一致。AlInP 窗口层在短波长光谱响应中起着重要作用^[36]。根据 EQE 曲线,太阳电池的短波长光谱响应明显衰减,这表明 AlInP 窗口层中发生了严重的复合^[37]。

为了进一步探究复合产生的原因,采用 SIMS 对 AlInP 窗口层以及 GaInP 子电池中 Al、Ga、In、P、As 和 O 的含量进行了测量,如图 6 所示。与湿热实验前各

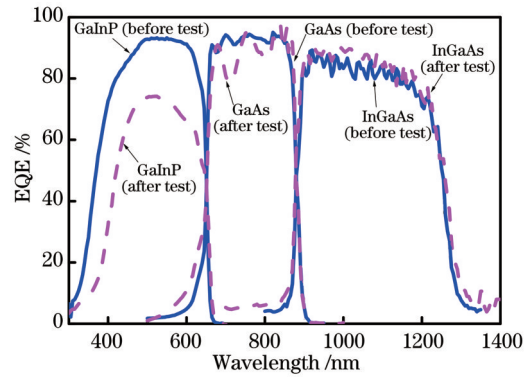


图 5 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池湿热实验前后 EQE
曲线
Fig. 5 EQE curves of GaInP/GaAs/InGaAs triple junction
solar cells before and after damp heat test

元素含量相比,湿热实验后 GaInP 子电池的发射极、基极等区域各元素的含量基本一致,而 AlInP 窗口层中各元素的含量分布与湿热实验前差异较大。与实验前 AlInP 窗口层中 Al 元素的分布情况相比,实验后 Al 元素的分布更加集中于 AlInP/GaInP 界面附近。这是因为 InGaAs 子电池和 GaAs 衬底之间存在晶格失配,失配内应力导致的位错缺陷在高温、高湿环境下形成缺陷通道,引起 AlInP 窗口层中各元素发生迁移,从而在界面处产生元素的聚集。而 Al 元素含量分布的改变会在 GaInP 发射区界面引入 Al 突变相关的缺陷,引发严重的复合,进而导致 GaInP 顶电池中光生载流子的收集率下降^[38]。由此可见,湿热实验过程中三结太阳电池短路电流密度的降低主要是由于 GaInP 顶电池的 AlInP 窗口层发生了退化。因此,即使 III-V 族化合物半导体材料本身性能稳定,也必须在实际环境的应用中使用封装保护层来保持器件性能。

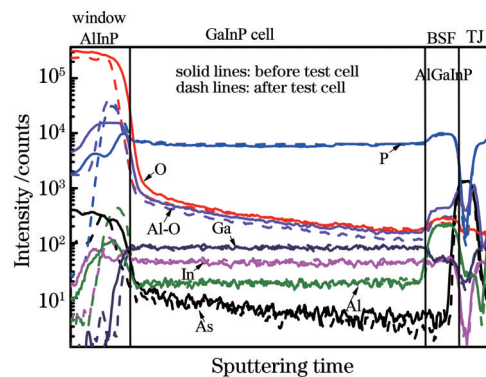


图 6 SIMS 测试湿热实验前后 Al、Ga、In、P、As 和 O 的含量
Fig. 6 Concentrs of Al, Ga, In, P, As, and O before and after
damp heat experiment vis SIMS test

4 结 论

本文研究了倒置 GaInP/GaAs/InGaAs 失配三结太阳电池的可靠性。在高温/高湿环境下, GaInP 顶电池发生退化,具体表现为 AlInP 材料中的元素含量分

布发生了明显改变,导致其对 340~480 nm 波段的光谱反射率提高。此外,AlInP/GaInP 界面 Al 元素的聚集引发了严重的复合效应,严重限制了三结太阳能电池的整体性能,SIMS 和 EQE 结果证明了这一现象。该研究结果证明了 AlInP 窗口层对多结太阳能电池环境稳定性有重要影响。

参 考 文 献

- [1] King R R, Law D C, Edmondson K M, et al. 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(18): 183516.
- [2] 颜平远,涂洁磊,艾尔肯·阿不都瓦衣提,等.基于布拉格反射器的 GaInP/Ga(In)As/Ge 三结太阳能电池电子辐照性能[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1631001.
Yan P Y, Tu J L, Aierken A, et al. Electron irradiation performance of GaInP/Ga(in)as/Ge triple junction solar cell based on Bragg reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1631001.
- [3] Zhang M Y, Guo Z, Sun L J, et al. Preparation of large area and high performance flexible GaInP/GaAs/InGaAs tandem solar cells[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(5): 518-522.
- [4] Takamoto T, Washio H, Juso H. Application of InGaP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells to space use and concentrator photovoltaic[C]//2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, June 8-13, 2014, Denver, CO, USA. New York: IEEE Press, 2014.
- [5] Adams J, Elarde V, Hains A, et al. Demonstration of multiple substrate reuses for inverted metamorphic solar cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3(2): 899-903.
- [6] Geisz J F, Kurtz S, Wanlass M W, et al. High-efficiency GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells grown inverted with a metamorphic bottom junction[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(2): 023502.
- [7] 孙希鹏,肖志斌,杜永超.新型砷化镓太阳能电池的宽带减反射膜设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0431002.
Sun X P, Xiao Z B, Du Y C. Design of broadband antireflection coating for new gallium arsenide solar cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0431002.
- [8] Huang X P, Long J H, Wu D Y, et al. Flexible four-junction inverted metamorphic AlGaInP/AlGaAs/In_{0.17}Ga_{0.83}As/In_{0.47}Ga_{0.53}As solar cell[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 208: 110398.
- [9] France R M, Geisz J F, García I, et al. Quadruple-junction inverted metamorphic concentrator devices[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(1): 432-437.
- [10] Geisz J F, Steiner M A, Jain N, et al. Building a six-junction inverted metamorphic concentrator solar cell[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, 8(2): 626-632.
- [11] Yamaguchi M, Dimroth F, Geisz J F, et al. Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(24): 240901.
- [12] Cardwell D, Kirk A, Stender C, et al. Very high specific power ELO solar cells (>3 kW/kg) for UAV, space, and portable power applications[C]//2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, June 25-30, 2017, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2017: 3511-3513.
- [13] Takamoto T, Juso H, Ueda K, et al. IMM triple-junction solar cells and modules optimized for space and terrestrial conditions[C]//2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, June 25-30, 2017, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2017: 3506-3510.
- [14] Kawai S, Tanahashi T, Fukumoto Y, et al. Causes of degradation identified by the extended thermal cycling test on commercially available crystalline silicon photovoltaic modules[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2017, 7(6): 1511-1518.
- [15] Núñez N, Vázquez M, González J R, et al. Instrumentation for accelerated life tests of concentrator solar cells[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(2): 024703.
- [16] 李俊炜,石成英,王祖军,等.不同能量质子辐照诱发子电池 GaAs 退化模拟研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0516003.
Li J W, Shi C Y, Wang Z J, et al. Theoretical simulation on degradation of GaAs sub-cells induced by proton irradiation with different energies[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0516003.
- [17] Espinet-González P, Romero R, Orlando V, et al. Case study in failure analysis of accelerated life tests (ALT) on III-V commercial triple-junction concentrator solar cells [C]//2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference, June 16-21, 2013, Tampa, FL, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1666-1671.
- [18] Núñez N, González J R, Vázquez M, et al. Evaluation of the reliability of high concentrator GaAs solar cells by means of temperature accelerated aging tests[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, 21(5): 1104-1113.
- [19] Espinet-González P, Algora C, Núñez N, et al. Temperature accelerated life test on commercial concentrator III-V triple-junction solar cells and reliability analysis as a function of the operating temperature[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2015, 23(5): 559-569.
- [20] Vazquez M, Tamayo-Arriola J, Orlando V, et al. Reliability of commercial triple junction concentrator solar cells under real climatic conditions and its influence on electricity cost[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2017, 25(11): 905-918.
- [21] Sharma V, Chandel S S. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 753-767.
- [22] Faye I, Ndiaye A, Gecke R, et al. Experimental study of observed defects in mini-modules based on crystalline silicon solar cell under damp heat and thermal cycle testing[J]. *Solar Energy*, 2019, 191: 161-166.
- [23] Makita K, Kamikawa Y, Mizuno H, et al. III-V//

- Cu_xIn_{1-x}Ga_ySe₂ multijunction solar cells with 27.2% efficiency fabricated using modified smart stack technology with Pd nanoparticle array and adhesive material[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2021, 29(8): 887-898.
- [24] Sakurai K, Takano A, Yanase H, et al. Japanese Task Group 8 activities in international PV module quality assurance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9179: 917905.
- [25] Long J H, Li X F, Sun Q J, et al. Simple processing and analysis of flexible III-V multijunction solar cells using low-temperature transfer technology[J]. *Solar RRL*, 2021, 5(7): 2100066.
- [26] Long J H, Xiao M, Huang X P, et al. High efficiency thin film GaInP/GaAs/InGaAs inverted metamorphic (IMM) solar cells based on electroplating process[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2019, 513: 38-42.
- [27] Timò G, Abagnale G, Armani N, et al. Novel approaches to MOVPE material deposition for high efficiency multijunction solar cells[J]. *Crystal Research and Technology*, 2014, 49(8): 606-613.
- [28] 孟海凤, 徐国宁, 张俊超, 等. 模拟太阳光与高空自然光条件下航天用三结砷化镓太阳能电池光电性能测量对比[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0312004.
- Meng H F, Xu G N, Zhang J C, et al. Comparison of photoelectric performance measurements for GaInP/InGaAs/Ge triple-junction space solar cells based on solar simulator and high altitude natural sunlight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0312004.
- [29] Long J H, Sun Q J, Li X F, et al. Subcells analysis of thin-film four-junction solar cells using optoelectronic reciprocity relation[J]. *Solar RRL*, 2021, 5(3): 2000542.
- [30] Roensch S, Hoheisel R, Dimroth F, et al. Subcell I-V characteristic analysis of GaInP/GaInAs/Ge solar cells using electroluminescence measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(25): 251113.
- [31] Hoheisel R, Dimroth F, Bett A W, et al. Electroluminescence analysis of irradiated GaInP/GaInAs/Ge space solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 108: 235-240.
- [32] 任攀, 吴凌远, 王伟平, 等. 高温导致三结太阳能电池电致发光谱变化[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121602.
- Ren P, Wu L Y, Wang W P, et al. Change of electroluminescence spectra of solar cells caused by heating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121602.
- [33] Khan A, Marupaduga S, Anandakrishnan S S, et al. Radiation response analysis of wide-gap p-AlInGaP for superhigh-efficiency space photovoltaics[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(22): 5218-5220.
- [34] Long J H, Wu D Y, Huang X P, et al. Failure analysis of thin-film four-junction inverted metamorphic solar cells [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2021, 29(2): 181-187.
- [35] Schultes F J, Christian T, Jones-Albertus R, et al. Temperature dependence of diffusion length, lifetime and minority electron mobility in GaInP[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(24): 242106.
- [36] Chmielewski D J, Lepkowski D L, Boyer J T, et al. Comparative study of ~2.05 eV lattice-matched and metamorphic (Al)GaInP solar cells grown by MOCVD [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, 8(6): 1601-1607.
- [37] Kurtz S R, Olson J M, Friedman D J, et al. Passivation of interfaces in high-efficiency photovoltaic devices[J]. *MRS Proceedings*, 1999, 573(1): 95-106.
- [38] Li X Y, Zhang W, Zhang J Q, et al. Study on 2.05 eV Al_{0.13}GaInP sub-cell and its hetero-structure cells[C]// 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, June 8-13, 2014, Denver, CO, USA. New York: IEEE Press, 2014: 479-481.