

基于晶圆键合的 GaInP/GaAs/InGaAsP 聚光三结太阳能电池

章继成¹, 关维维², 孙强健^{3*}

(1. 三峡电能有限公司, 湖北 武汉 430015;

2. 中国长江电力股份有限公司, 北京 100033;

3. 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: 采用全固态分子束外延(MBE)技术在 InP 衬底上生长 InGaAsP 材料, 获得了与衬底之间没有失配位错且界面质量和发光质量较好的 1.05 eV 的 InGaAsP 材料。在此基础上, 分别在 InP 衬底上生长 InGaAsP 单结太阳能电池以及 GaAs 衬底上生长 GaInP/GaAs 双结太阳能电池。利用晶圆键合技术将两个分立的电池键合制备成一个 GaInP/GaAs/InGaAsP 三结太阳能电池。在地面光谱 AM1.5G (Air Mass 1.5 Global) 太阳模拟器下, GaInP/GaAs/InGaAsP 晶圆键合太阳能电池的转换效率为 30.6%, 聚光下获得了 34% 的效率。研究结果表明, MBE 能够生长出材料质量佳的 InGaAsP 材料, 室温晶圆键合技术在制备多结太阳能电池方面具有很大的潜力。

关键词: 分子束外延; InGaAsP; 晶圆键合; GaAs; 聚光太阳能电池

中图分类号: TN36

文献标识码: A

The investigation of concentrated triple-junction solar cells based on InGaAsP

ZHANG Ji-Cheng¹, GUAN Wei-Wei², SUN Qiang-Jian^{3*}

(1. Three Gorges Electric Energy Co., Ltd, Wuhan 430015, China;

2. China Yangtze power Co., Ltd, Beijing 100033, China;

3. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)

Abstract: The InGaAsP material with an energy bandgap of 1.05 eV was grown on InP substrate by all-solid-state Molecular Beam Epitaxy (MBE) technique. The material had no mismatch dislocations between the substrate and the epitaxial layer, and also exhibited high interface quality and luminescence quality. Based on InGaAsP material, single-junction InGaAsP solar cells were grown on InP substrates, and GaInP/GaAs dual-junction solar cells were grown on GaAs substrates. These two separate cells were then bonded together using the wafer bonding technology to fabricate a GaInP/GaAs/InGaAsP triple-junction solar cell. Under the AM1.5G solar simulator, the conversion efficiency of the GaInP/GaAs/InGaAsP wafer-bonded solar cell was 30.6%, achieving an efficiency of 34% under concentration. The results indicate that MBE can produce high-quality InGaAsP material, and that room-temperature wafer bonding technology holds great potential for the fabrication of multi-junction solar cells.

Key words: molecular beam epitaxy, InGaAsP, GaAs, wafer bonding, concentrated photovoltaic

引言

太阳能电池利用半导体材料的光生伏特效应将

吸收的光能转化为电能。太阳光谱分布范围较宽, 而单结太阳能电池的带隙却是固定的, 只能吸收其带隙以上的太阳光, 能量过高的短波光光子会因热损失

收稿日期: 2024-12-21, 修回日期: 2025-01-12

Received date: 2024-12-21, Revised date: 2025-01-12

基金项目: 中国长江电力股份有限公司、三峡电能有限公司资助(Z152302052/Z612302016)

Foundation items: Supported by Three Gorges Electric Energy Co., Ltd, and China Yangtze power Co., Ltd (Z152302052/Z612302016)

作者简介(Biography): 章继成(1993-), 男(满族), 四川大邑人, 中级工程师, 硕士学位, 主要研究领域为人工智能在电力系统中的应用。E-mail: zhang_jicheng@ctg.com.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: qjsun2019@sinano.ac.cn

掉,因此单结太阳电池存在效率极限^[1]。为突破这一限制,多结太阳电池通过设计阶梯式带隙材料的叠层结构,让不同材料子电池分别匹配太阳光谱的不同波段,实现全光谱的高效吸收,提高光电转换效率^[2-4]。其中,以第三族元素(如镓、铝)和第五族元素(如砷、磷)构成的 III-V 族化合物半导体,因具备直接跃迁带隙特性、极强的光吸收能力、高载流子迁移速率及良好的热稳定性等优势,成为研发高效多结叠层太阳电池的核心优选材料^[5]。

III-V 族多结太阳电池已展现出卓越的光电转换效率。AM1.5G 光谱下, GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池效率已经达到 37.9%^[5]。通过对中间子电池引入量子阱(MQW)结构进行优化,三结太阳电池在 AM1.5G 下的效率进一步提升至 39.5%^[3]。由于 III-V 族太阳电池具备稳定的性能和优异的抗辐射特性,目前已在空间电源系统中得到广泛应用^[6-9]。

GaInP/GaAs 材料由于与 GaAs 衬底晶格匹配,且能够实现对能量较高的可见光部分的吸收,因此通常被用作顶层子电池。但是该双结电池无法实现对近红外部分的光吸收,因此需要在其底部叠层带隙更低材料实现红外部分的光吸收。四元化合物 InGaAsP 材料,可以通过调整三族元素和五族元素的组分控制带隙,具有从 0.74 eV 到 1.34 eV 带隙可变的优点,对应于从可见光到近红外的宽光谱范围,且能够在 InP 衬底上晶格匹配生长^[10-11]。由于其良好的光电性能, InGaAsP 已经成为光电探测器和多结光伏器件中的吸收材料候选材料,也是用于多结叠层太阳电池中第三结子电池的优秀材料^[12-15]。

然而,由于不同材料的晶格常数不同,多结叠层太阳电池的直接外延生长非常复杂,需要在两个失配材料之间生长缓冲层^[15-17]。缓冲层厚度和生长条件都需要精确控制,否则会对在其上层生长的材料质量造成不利影响^[18]。通过晶圆键合直接将不同材料的电池堆叠在一起,键合集成为单片多结太阳电池则避免了失配生长的缓冲层调控问题,保证每个结构良好的材料质量,是一种较为灵活方案^[19, 20]。

本文研究了通过 MBE 在 InP 衬底上生长 InGaAsP 材料,并表征其性能。制备了 InGaAsP 单结太阳电池,光电转换效率为 16.2%。通过晶圆键合将分别在 GaAs 衬底上生长的 GaInP/GaAs 双结太阳电池和 InP 衬底上生长的 InGaAsP 太阳电池集成为

一个单片 GaInP/GaAs/InGaAsP 三结太阳电池,在 AM1.5G 下三结电池效率达到 30.6%。

1 InGaAsP 材料生长及器件性能

采用 Veeco 公司的双腔分子束外延(MBE)设备完成材料生长。设备配置了反射式高能电子衍射仪(RHEED),可以对生长过程进行实时监测。通过衬底升温过程中, RHEED 荧光屏上衍射斑点的亮度变化,判断脱氧。在材料生长阶段,通过衍射图样观察材料生长模式及表面再构。

GaAs 和 InP 衬底采用免清洗衬底。GaAs 衬底上生长 GaInP 通常在 500 °C-530 °C,生长速率 1 μm/h,五族源流量与三族源流量的比值(V/III 比)为 50。衬底首先需要在预处理室内热处理 1 小时左右,然后再传送到生长腔室。在生长室中进一步升高衬底温度直到脱氧,升温期间在适当的温度开启五族元素保护衬底表面,防止表面材料分解。其中, InP 衬底在红外测温计(pyro)的 495 °C 条件下热脱附 5 min。为了获得光学质量较好的材料, InGaAsP 材料的典型生长温度为 500 °C 左右,生长速率为 1 μm/h。利用束流监控仪和 X 射线衍射仪(XRD)控制 In 和 Ga 的比例。

与三族源不同的是砷(As)和磷(P)的粘着系数不是统一的,相对原子并入率与 V/III 比、Ga 束流和生长温度密切相关。五(V)族源 P 的分子束流等效压力(BEP)为 1.6-2.3×10⁻⁵ Torr, As 的为 2-2.5×10⁻⁶ Torr。通过将各束源炉的束流规测试束流值相加后相除计算 V/III 束流比,通常 V/III 束流比为 75-100。As 与 V 族源流量总和的比例影响 V/III 比,且 V/III 比对 As 流量比较敏感,因此需要谨慎控制 As 流量, InGaAsP 材料生长的 As 流量的调控窗口比较小。在 InP 衬底上生长的晶格匹配的 InGaAsP 时, As 流量等效压力(BEP)的比例与 V/III 比的关系如图 1 所示。二者是非线性函数,基于两个温度下的数据点通过幂指数函数拟合,发现 V/III 与 As 流量等效压力(BEP)的比例在一定范围内呈幂指数关系。

图 2 是 InP 衬底上生长的 In 组分为 78%, As 组分为 71%,晶格失配度为 2.5E-3 的 InGaAsP 的透射电镜(TEM)图片。 InGaAsP 材料与 InP 材料界面清晰,并且 InGaAsP 材料质量较好。界面没有产生位错,说明生长的材料与衬底之间晶格匹配良好。

通过光致发光(PL)可以了解材料带隙和质量,发光强度随着时间的衰减关系还可以了解载流子

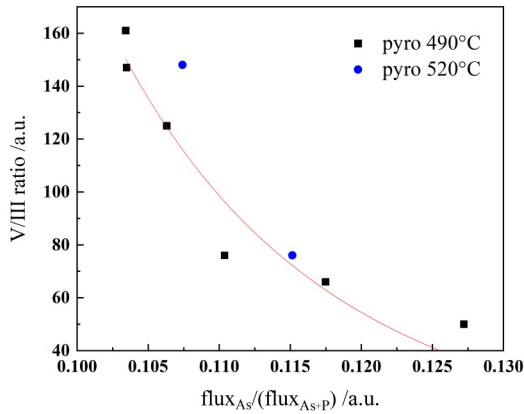


图1 InGaAsP中As源BEP比例与V/III的关系

Fig. 1 The relationship between As BEP and V/III

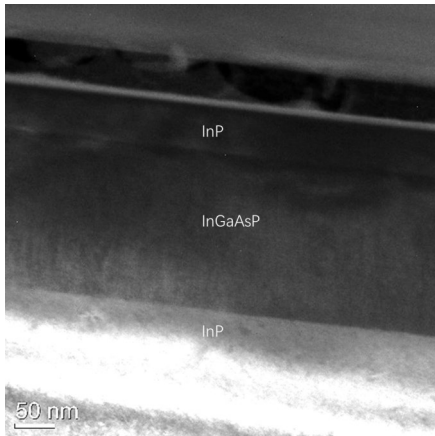


图2 InP衬底上InGaAsP材料的截面透射电镜

Fig. 2 Cross section TEM of InGaAsP on InP Substrate

的寿命特征。图3是InGaAsP材料的温度依赖PL以及时间分辨光致发光(TRPL)。图3(a)表明,低温下,非辐射复合被抑制,发光峰强度较高,且半高宽较窄。随着温度的升高,非辐射复合显著增加,波形逐渐展宽,发光强度变弱。且随着温度的升高,PL峰能量逐渐向低能方向移动。在高温阶段,PL峰值能量的变化符合Varshni公式^[22]。在300 K时,PL峰值能量为1.05 eV,符合设计的三结太阳能电池带隙需求。载流子的复合机制影响载流子的寿命和输运过程,这对太阳能电池的器件设计和性能至关重要。因此,还进行了TRPL测试。载流子的发光寿命情况是判断材料质量的一个非常重要的性能指标,PL强度随时间变化关系如图3(b)所示。在测试温度是10 K,激发光源为800 nm,激发功率1 mW,脉宽100 fs的测试条件下,观察到PL发光弛豫时间呈单 e 指数衰减曲线。在10K,PL积分强度随时间常数的衰减规律符合 $I(t) = I_0 \exp(-t/\tau)$ 的规

律。通过强度衰减曲线计算PL衰减时间为3.85 ns,改变激发功率,衰减时间变化很小(插图)。这表明辐射复合在复合过程中起主导作用。

根据对InGaAsP材料生长条件的摸索,生长并

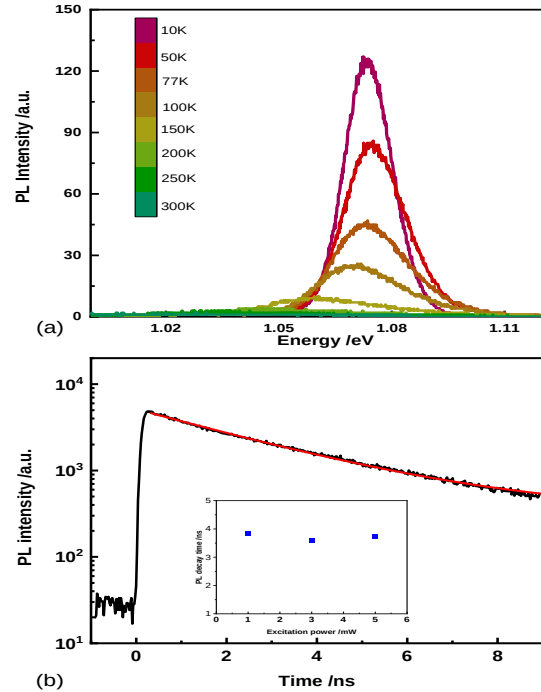


图3 InGaAsP材料的温度依赖光致发光光谱以及时间分辨光致发光

Fig. 3 Temperature dependent PL and time-resolved PL of InGaAsP materials

制备了InGaAsP单结太阳能电池器件。图4是AM1.5G光谱下,InGaAsP太阳能电池电流-电压(I - V)特性。在1个太阳下的测试结果表明,InGaAsP太阳能电池的光电转换效率为16.3%,开路电压(V_{oc})为0.52 V,短路电流密度(J_{sc})为41.5 mA/cm²,填充因子(FF)为75.3%。开路电压的带隙偏压为0.48 V。为了提高太阳能电池的性能,提高开路电压,可以进一步改善生长参数,减少非辐射。而团队制备的GaAs/GaInP双结电池在1个太阳AM1.5G下,其光电转换效率可以达到27%。

2 三结太阳能电池

三结太阳能电池的典型结构如图5所示。每个子电池结构由p型基区层、n型发射极层和异质结组成,异质结作为背表面场(BSF)层和窗口层以减少表面复合。GaInP电池,包括750 nm基区层(3.5×10^{16} cm⁻³)和80 nm发射极层(1×10^{18} cm⁻³)。GaAs电

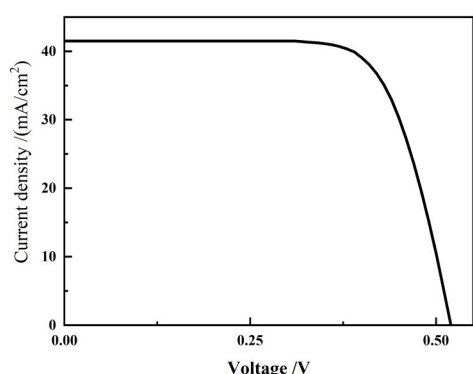


图4 InGaAsP太阳电池I-V特性

Fig. 4 I-V characteristics of InGaAsP solar cell

池由1000 nm基区层($5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)和100 nm发射极层($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)组成。GaInP电池采用15 nm硅(Si)掺杂AlInP($4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)和30 nm铍(Be)掺杂AlGaInP($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)分别作为窗口层和BSF层。GaAs电池窗口层和BSF层分别为30 nm GaInP($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)和500 nm GaInP($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。通过15 nm p+-GaAs($3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)和15 nm n+-GaAs($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)组成的重掺杂隧道结连接GaInP顶层电池与GaAs中间电池,防止直接生长造成器件反偏。InGaAsP电池具有2500 nm的基区层($5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)和200 nm的发射极层($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。以Si掺杂InP($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)和Be掺杂InP($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)分别作为窗口层和BSF层。

GaInP/GaAs顶部串联双结电池生长在GaAs衬底上,底部InGaAsP太阳电池生长在InP衬底上。在键合界面处采用掺杂密度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的重掺杂p-GaAs层和n-InP层实现较低的界面电阻。

采用室温晶圆键合技术,将GaAs基顶层双结电池与InP基底层电池进行键合,制备了GaInP/GaAs/InGaAsP三结太阳电池。键合过程在配备氩离子枪的高真空($<10^{-5} \text{ Pa}$)晶圆键合机中进行。高真空的环境能够有效避免污染,保证清洁的键合界面。直接生长的晶格匹配外延表面粗糙度为1 nm左右,取两寸片的1/4片大小的两个太阳电池,将两个待键合的晶圆进行样品清洁,然后一起放入键合机内,对键合机进行抽真空至高真空腔室,以避免环境中杂质对键合质量的影响。然后,用低能氩离子枪轰击两个电池的表面,以激活表面产生悬挂键。最后,将这两个晶圆紧密接触,向其施加5000 N压力,使两者键合到一起。键合完成后通过氨水双氧水溶液腐蚀去除GaAs衬底,按照传统的III-V族太阳电池工艺制作三结太阳电池。采用射频溅射的

方法在GaAs接触层上形成AuGe/Ni/Au欧姆接触金属,并在GaInP顶层电池的窗口层上沉积抗反射涂层。晶圆键合太阳电池的尺寸为 $5.0 \times 5.0 \text{ mm}^2$ 。在太阳模拟器下测量I-V曲线。

采用晶圆键合技术制备的GaInP/GaAs/InGaAsP三结电池能够保证各外延层之间的界面清晰。在每个子电池中都没有出现通

常在晶格失配外延生长中出现的螺位错和平面缺陷。材料的生长参数调控比失配生长容易。由于晶圆键合过程中界面处理和压强合理,界面具有较高的机械稳定性,在晶圆键合界面中没有发现空洞和位错。两种不同材料之间存在一薄层非晶界面层,如图6所示。非晶层是由界面处两种不同晶格常数的材料之间的键结合形成的,厚度约6 nm,具有类似隧道结的电流传输特性^[23]。

图7为AM1.5G太阳模拟器下,晶圆键合GaInP/GaAs/InGaAsP三结太阳电池的I-V特性。该晶圆键合三结太阳电池的光电转换效率为30.6%,开路电压(V_{oc})为2.76V,短路电流密度(J_{sc})为12.8 mA/cm²,填充因子(FF)为86.7%,电池效率与同外延结构不同缓冲层的三结太阳电池结果一致^[24]。为了实现电流匹配,GaAs子电池厚度被大幅减薄。

根据插图的EQE曲线,可以计算出各个子电池的电流密度。为了与I-V特性做参照,其中的太阳光谱采用AM1.5G光谱。计算出的InGaAsP子电池的短路电流密度为10.7 mA/cm²。InGaAsP和GaAs子电池的短路电流密度相当,而GaInP子电池的电流密度相比二者较高。而量子效



图5 键合三结太阳电池结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the structure of a bonded triple junction solar cell

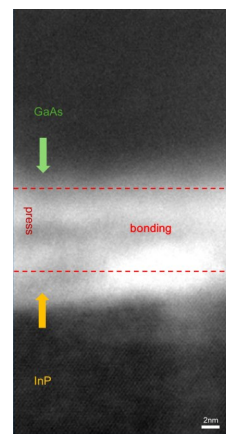


图6 键合界面图

Fig. 6 STEM image of bonded triple junction solar cell

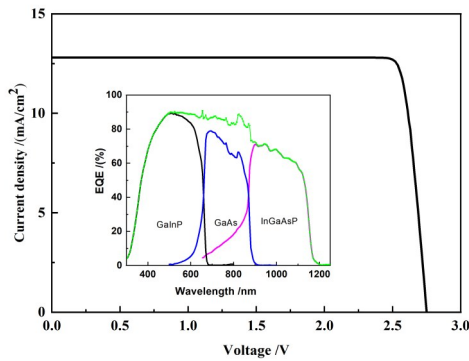


图7 键合三结太阳电池 J - V 特性及量子效率(插图)

Fig. 7 J - V characteristics of bonded triple junction solar cells, the inset is quantum efficiency

率与 I - V 不完全一致的可能主要在于太阳模拟器在长波部分并不能完全与理论的太阳光谱完全匹配。然而,使用标准的AM1.5G光谱来计算电流密度可以从一定程度上指导电池结构的进一步优化。带隙组合为1.9/1.4/1.0 eV的三结电池在一个太阳下的理论效率可达38%。因此,晶圆键合GaInP/GaAs/InGaAsP太阳能电池的效率还有提升空间,可以通过优化每个子电池的基区层厚度以及每个单结的器件性能来实现。三结太阳电池中InGaP、GaAs和InGaAsP的吸收层厚度分别为830 nm、1100 nm和2700 nm。从EQE曲线可知,GaInP子电池的电流密度与底层两个子电池失配较大,三结太阳电池的短路电流密度主要受限于电流密度最低的InGaAsP子电池,从每个子电池的串联电路来看是合理的。因此,需要进一步研究子电池的电流匹配、顶电池厚度以及InGaAsP材料。其InGaAsP材料的带隙能量、掺杂浓度和生长参数等对提高晶圆键合多结太阳能电池的性能具有重要意义。

图8是聚光下晶圆键合GaInP/GaAs/InGaAsP三结太阳电池的开路电压,短路电流,填充因子以及效率的变化曲线。从图中可以看出,随着聚光倍数的增加,电流密度和开路电压都增加,填充因子和电池效率则先增加后下降。在80倍聚光下,实现了34.1%的光电转换效率。继续增加聚光倍数电池仍然能够正常工作,说明该键合方式能适用于高电流。

尽管该电池已达到较高的聚光效率,但器件性能仍可以从工艺和结构设计方面进一步提升。聚光下本GaInP/GaAs/InGaAsP三结太阳电池效率的提升不剧烈的一个原因在于电极设计。由于单个太阳下的太阳电池需要较小的电极遮蔽,而聚光下

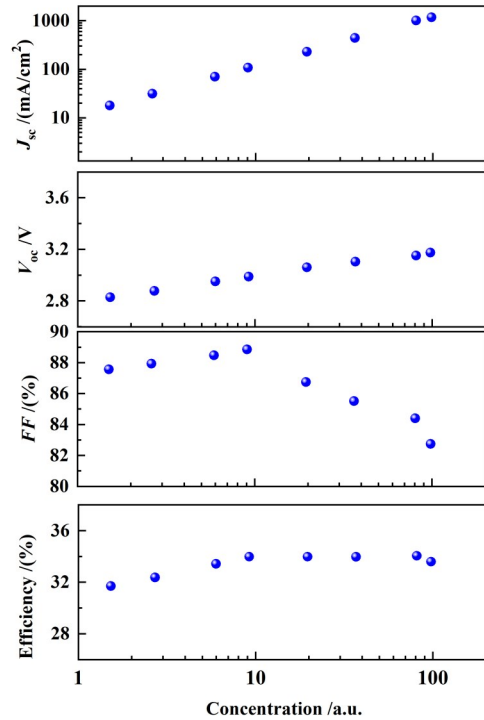


图8 聚光下三结太阳电池性能随着倍数的变化

Fig. 8 J_{sc} , V_{oc} , efficiency and FF of the triple-junction solar cell under concentration

太阳电池需要更密集的电极布局和电流收集能力。进一步提高电池效率需要改进电极密度缩短横向扩展电阻。其次,由于GaInP子电池的电流密度相对于其他两个子电池的差异较大,导致在高倍聚光下后者限流,影响整个多结电池效率的进一步提升。因此,需要进一步优化GaInP子电池结构以实现更好的电流匹配。

3 结语

采用全固态MBE在InP衬底上生长了界面质量和光学质量良好的InGaAsP材料。在此基础上制备了电池效率为16.2%的InGaAsP单结太阳电池。采用InGaAsP作为三结太阳电池的底电池材料,与在GaAs衬底上生长的GaInP/GaAs双结太阳电池通过晶圆键合制备成GaInP/GaAs/InGaAsP三结太阳电池。在1个太阳AM1.5G条件下,晶圆键合三结太阳电池在的转换效率为30.6%,聚光下效率达到34.1%。

致谢:感谢中国长江电力股份有限公司对高倍聚光太阳能发电系统的应用研究项目的支持。此成果由中国长江电力股份有限公司、三峡电能有限公司

资助(合同编号: Z152302052/Z612302016)

References

- [1] HENRY C H. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial sol cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(8): 4494–4500.
- [2] GEISZ J F, FRANCE R M, SCHULTE K L, et al. Six-junction III – V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration [J]. *Nature Energy*, 2020, 5: 326–335.
- [3] FRANCE R M, GEISZ J F, SONG T, et al. Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices [J]. *Joule*, 2022, 6 (5): 1121–1135.
- [4] ZHANG Yi, LONG Jun-Hua, SUN Qiang-Jian, et al. Analysis of Inverted GaInP/GaAs/InGaAs Triple-Junction Solar Cell Failure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42 (20): 6.
(张怡, 龙军华, 孙强健, 等. 倒置GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳电池失效分析[J]. *光学学报*), 2022, 42(20): 6.
- [5] GREEN M A, DUNLOP E D, YOSHITA M. Solar cell efficiency tables (Version 64) [J]. *Progress in Photovoltaics Research and Application*, 2024, 32: 425 – 441.
- [6] LI J, Aierken A, ZHUANG Y, et al. 1 MeV electron and 10 MeV proton irradiation effects on inverted metamorphic GaInP/GaAs/InGaAs triple junction solar cell [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 224: 111022.
- [7] YAN G, WANG J L, LIU J, et al. Electroluminescence analysis of VOC degradation of individual subcell in GaInP/GaAs/Ge space solar cells irradiated by 1.0 MeV electrons [J]. *Journal of Luminescence*, 2020, 219: 116905.
- [8] GUO H, SHI L, SUN Q, et al. Degradation of up-grown metamorphic InGaP/InGaAs/Ge solar cells by low-energy proton irradiation [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 191: 399.
- [9] WANG Zu-Jun, WANG Xing-Hong, Yan Shi-Xing, et al. Progress of Radiation Effects on GaInP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cell [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(03): 490–504.
(王祖军, 王兴鸿, 晏石兴, 等. GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池辐照损伤效应及加固技术研究进展 [J]. *半导体光电*), 2022, 43(03): 490–504.
- [10] LU Hong-Bo, LI Xin-Yi, Li Ge, et al. Reducing Voc loss in InGaAsP/InGaAs dual-junction solar cells [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(01): 7–11.
(陆宏波, 李欣益, 李戈, 等. InGaAsP/InGaAs双结太阳电池的开路电压损耗抑制(英文)[J]. *红外与毫米波学报*), 2021, 40(01): 7–11.
- [11] QI Yu-Fei, WANG Wen-Juan, SUN Jing-Hua, et al. High detection efficiency InGaAsP/InP single-photon avalanche diode at room temperature [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43(01): 1–6.
(祁雨菲, 王文娟, 孙京华, 等. 室温下高探测效率InGaAsP/InP单光子雪崩二极管(英文)[J]. *红外与毫米波学报*), 2024, 43(01): 1–6.
- [12] DUAN Yang, LIN Zhong-Xi, SU Hui. 1.74 μm mode-locked semiconductor laser with a high-strained InGaAs/InGaAsP multi-quantum wells structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024(6): 90–97.
(段阳, 林中晞, 苏辉. 1.74 μm 大应变InGaAs/InGaAsP半导体锁模激光器 [J]. *红外与激光工程*), 2024(6): 90–97.
- [13] Li Xue-Fei, Yang Wen-Xian, Long Jun-Hua, et al. Electroluminescence explored internal behavior of carriers in InGaAsP single-junction solar cell [J]. *Chinese Physics B* 2023, 32(1): 539–544.
- [14] QIN Jie, SUN Yu-Run, YU Shu-Zhen et al. 1310 nm InGaAsP Multi-Junction Laser Power Converters [J]. *Semiconductor Technology*, 2023, 48(8): 658–664.
(秦杰, 孙玉润, 于淑珍, 等. 1310nm InGaAsP多结激光电池 [J]. *半导体技术*), 2023, 48(8): 658–664.
- [15] Chen F, Zong M, Tang T X. Degradation characteristics and equivalent analysis of InGaAsP space solar cells under proton and neutron irradiation [J]. *Microelectronics and reliability*, 2023, 151: 115249.1–115249.12.
- [16] SCHN J, BISSELS G, MULDER P, et al. Improvements in ultra-light and flexible epitaxial lift-off GaInP/GaAs/GaInAs solar cells for space applications [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2022, 30: 1003–1011.
- [17] LONG J, SUN Q, LI X, et al. Subcells Analysis of Thin Film Four-Junction Solar Cells Using Optoelectronic Reciprocity Relation [J]. *Solar RRL*, 2021, 5: 2000542.
- [18] LONG J, LI X, SUN Q, et al. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 208: 11039. Simple Processing and Analysis of Flexible III – V Multijunction Solar Cells Using Low-Temperature Transfer Technology [J]. *Solar RRL*, 2021, 5: 2100066.
- [19] SUN Q, LONG J, WU X, et al. Realization of Flexible Large-Sized GaInP/GaAs/InGaAs Solar Cells With Stable Low-Temperature Ohmic Contact Technique [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, 70(8): 4280–4285.
- [20] DAI P, JI L, TAN M, et al. Electron irradiation study of room-temperature wafer-bonded four-junction solar cell grown by MBE [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 171: 18–122.
- [21] DAI P, YANG W, LONG J, et al. The investigation of wafer-bonded multi-junction solar cell grown by MBE [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2019, 515: 064.
- [22] YANG Wen-Xian, JI Lian, DAI Pan, et al. Study on photoluminescence properties of 1.05 eV InGaAsP layers grown by molecular beam epitaxy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 64(17): 350–356.
(杨文献, 季莲, 代盼, 等. 基于分子束外延生长的1.05 eV InGaAsP的超快光学特性研究 [J]. *物理学报*), 2015, 64(17): 350–356.
- [23] UCHIDA S, WATANABE T, YOSHIDA H, et al. Room-temperature GaAs/InP wafer bonding with extremely low resistance [J]. *Applied physics express*, 2014, 7(11): 112301.
- [24] YANG W X, DAI P, JI L, et al. Investigation of room-temperature wafer bonded GaInP/GaAs/InGaAsP triple-junction solar cells [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389: 673–678.