

空间用倒装三结太阳能电池及其抗辐射性能研究

宋明辉 王笃祥 毕京锋 陈文浚 李明阳 李森林 刘冠洲 吴超瑜

Inverted metamorphic triple-junction solar cell and its radiation hardness for space applications

Song Ming-Hui Wang Du-Xiang Bi Jing-Feng Chen Wen-Jun Li Ming-Yang Li Sen-Lin Liu Guan-Zhou Wu Chao-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 188801 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.188801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.188801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

掺杂非晶氧化硅薄膜中三元化合态与电子结构的第一性原理计算

First principle study of ternary combined-state and electronic structure in amorphous silica

物理学报.2017, 66(18): 188802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.188802>

硅锗量子阱结构在硅异质结太阳能电池中应用的数值模拟

Numerical simulation of silicon heterojunction solar cells with Si/Si_{1-x}Ge_x quantum wells

物理学报.2016, 65(13): 138801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.138801>

Al 纳米颗粒增强微晶硅薄膜太阳能电池光吸收的模拟研究

Numerical simulation of light absorption enhancement in microcrystalline silicon solar cells with Al nanoparticle arrays

物理学报.2015, 64(24): 248801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.248801>

聚合物和小分子叠层结构有机太阳能电池研究

A Study of tandem structure organic solar cells composed of polymer and small molecular sub-cells

物理学报.2014, 63(21): 218801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.218801>

前后光栅周期对于双光栅结构薄膜太阳能电池光俘获效应的影响

Influence of front and back grating period on light trapping of dual-grating structure thin film solar cell

物理学报.2014, 63(19): 198801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198801>

空间用倒装三结太阳能电池及其抗辐射性能研究*

宋明辉† 王笃祥 毕京锋 陈文浚 李明阳 李森林 刘冠洲 吴超瑜

(天津三安光电有限公司, 天津 300387)

(2017年5月5日收到; 2017年6月7日收到修改稿)

使用金属有机化学气相沉积技术, 在4英寸GaAs衬底上获得了空间用GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As倒装三结太阳能电池. 高分辨X射线衍射和阴极射线发光测试结果表明AlInGaAs应力渐变缓冲层的晶格弛豫度约100%, 其整面平均穿透位错密度约 $5.4 \times 10^6/\text{cm}^2$. 与GaInP/InGaAs/Ge常规三结太阳能电池相比, 在AM0光谱、25 °C测试条件下, 面积24 cm²的倒装三结太阳能电池转换效率达到32%, 输出功率提高了5%. 采用1 MeV高能电子对倒装三结电池进行粒子辐照测试, 电池各项性能参数随不同辐照剂量发生改变, 在 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 辐照总剂量下电池转换效率衰减比例达到15%.

关键词: 倒装生长, 空间电池, 电子辐照

PACS: 88.40.Hj, 84.60.Jt, 61.80.Fe

DOI: 10.7498/aps.66.188801

1 引言

近年来, 随着金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术的不断发展进步, III-V族化合物半导体多结太阳能电池性能得到不断改善, 并以其较高的转换效率、较好的温度系数和抗辐射能力取代了Si电池成为空间飞行器的主要能量来源. 目前, 国际上研究最多且应用最广的多结电池为Ga_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.01}Ga_{0.99}As/Ge三结电池. Ga_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.01}Ga_{0.99}As/Ge三结电池具有晶格匹配的优点, 容易通过MOCVD技术外延获得较高的晶体质量, 实现较高的光电转换效率. 经过研究人员多年的不懈努力, 此类型三结电池的大规模量产效率已从24%提高到了30%, 然而其效率进一步提升的空间是有限的^[1-3]. 理论实验研究表明, Ga_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.01}Ga_{0.99}As/Ge三结电池中Ge底电池电流一般是Ga_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.01}Ga_{0.99}As/Ge顶中电池的1.5倍以上, 多余的电流对三结电池效率并无贡献.

使用带隙为1.0 eV的In_{0.3}Ga_{0.7}As作为三结电池的底电池, 可以在保证其他参数不变(如短路电流和填充因子)的情况下有效提高三结电池的开路电压, 继而使得三结电池转换效率达到32%以上(AM0, 单倍). 优先生长晶格匹配的顶中子电池, 再生长晶格失配的底电池这一电池结构被称为倒装三结太阳能电池^[4]. 2005年美国国家能源部可再生能源实验室(NREL)率先开展了GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As倒装三结电池的相关研究, 单倍、AM1.5G光谱、25 °C下实现转换效率31.1%, 2007年研究人员又将电池转换效率提升到了33.8%, 同时单倍、AM0光谱下电池转换效率达到30.6%^[5,6]. 然而, 随后美国Emcore公司却一直保持了该研究方向上的国际领先地位. 2008年, Emcore公司报道其4 cm²面积的GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As倒装三结电池, 单倍、AM0下转换效率达到32%^[7], 2012年进一步开发出了GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As倒装四结太阳能电池, 转换效率达到34.5%, 辐照维持比约82%^[8,9]. 最近该公司已成功推出倒

* 天津市科技小巨人领军企业培育重大项目(批准号: 14ZXLJGX00400)和天津市科技支撑计划(批准号: 16YFZCGX00030)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: songminghui@sanan-e.com

装四结电池产品, 量产转换效率约33%, 辐照维持比约81%. 此外, 美国Spectrolab公司和日本Sharp公司也在这一研究方向上开展了许多相关工作^[10-12]. 2013年, Spectrolab公司报道其24 cm²面积的AlGaInP/GaAs/InGaAs倒装三结电池和AlGaInP/AlGaAs/InGaAs/InGaAs倒装四结电池, 单倍、AM0下转换效率均为32.1%, 而辐照维持比分别为84%和80%^[12]. 2014年, Sharp公司报道其27 cm²面积的GaInP/GaAs/InGaAs倒装三结电池, 单倍, AM0下转换效率为31.5%, 而辐照后转换效率衰降为27%, 辐照维持比约85.7%^[10].

相比之下, 国内在这一领域的研究相对较少. 本文对空间用GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As倒装三结太阳能电池及其抗辐照性能进行研究, 高分辨X射线衍射(HRXRD)和阴极射线发光(CL)测试结果显示倒装三结太阳能电池具有良好的晶体质量和低的穿透位错密度. *I-V*测试结果显示, 单倍、AM0、25 °C下面积24 cm²的倒装三结太阳能电池转换效率达到32%, 1 MeV电子、1 × 10¹⁵/cm²辐照总剂量下电池转换效率衰降约为27.2%, 衰降比例约15%.

2 实验过程

本文采用量产型AIX2800-G4 LP-MOCVD系统进行材料的外延生长, 以砷烷(AsH₃)、磷烷

(PH₃)、三甲基铝(TMAI)、三甲基镓(TMGa)和三甲基铟(TMIn)作为化学气相反应源, 乙硅烷(Si₂H₆)和二乙基锌(DEZn)作为掺杂源, 氢气(H₂)作为载气, 选用直径4英寸(1 in = 2.54 cm), (100)面偏向(111)面9°的n型GaAs作为生长衬底. 材料生长过程中反应室压力维持在50 mbar (1 bar = 10⁵ Pa), 温度控制在600—700 °C之间.

图1所示为空间用GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As倒装三结太阳能电池和AlInGaAs应力渐变缓冲层结构示意图, 首先在GaAs衬底上外延生长晶格匹配的GaInP顶电池和GaAs中电池, 顶中电池之间由GaInP:Te/AlGaAs:C宽带隙隧穿结连接, 紧接着生长第二个GaInP:Te/AlGaAs:C宽带隙隧穿结用于连接中底电池, 然后在第二个隧穿结上外延生长AlInGaAs应力渐变缓冲层, 晶格常数由GaAs的5.654 Å增大到In_{0.3}Ga_{0.7}As的5.775 Å, 晶格失配度约为2%, 最后生长In_{0.3}Ga_{0.7}As底电池. 本文采用Al和Ga流量不变、In流量逐层增加的方式生长AlInGaAs应力渐变缓冲层, 整个渐变缓冲层的带隙宽度均高于GaAs, 以实现对在In_{0.3}Ga_{0.7}As底电池良好的透光性. 外延生长之后, 使用HRXRD分析测试电池结构的晶体质量、应力弛豫度和组分, 使用CL检测电池结构, 主要是应力渐变缓冲层的穿透位错密度.

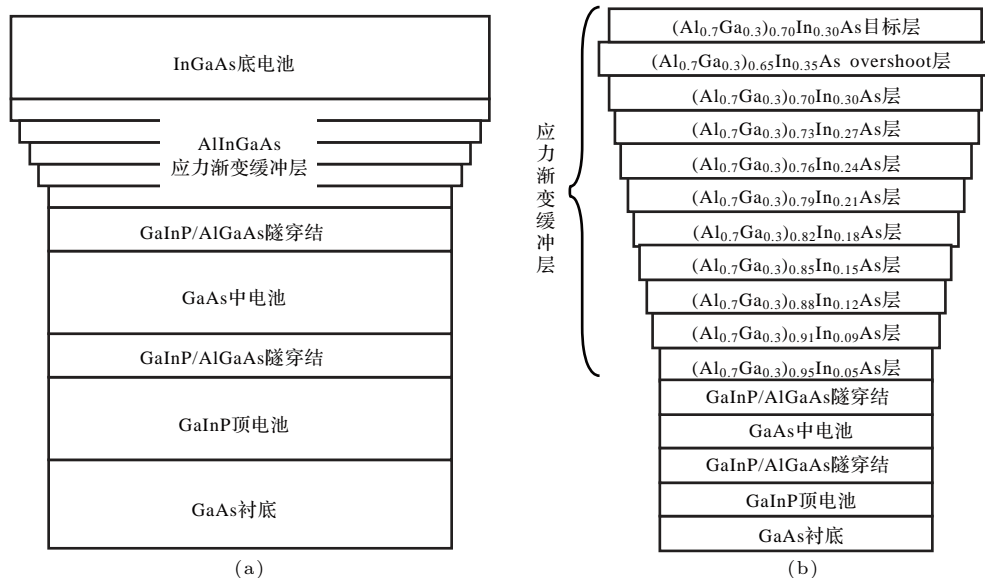


图1 (a) 空间用GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As倒装三结太阳能电池; (b) AlInGaAs应力渐变缓冲层结构示意图
 Fig. 1. Schematic structures of (a) inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As triple-junction solar cell and (b) AlInGaAs graded buffer for space application.

以Si片作为支撑衬底,通过Au-Au键合工艺将三结电池倒置键合在Si片上,去除GaAs生长衬底后实现电池结构的翻转,之后通过常规芯片工艺将电池外延片制作成面积为 24 cm^2 的电池芯片.设定电极占空比为1.5%,采用光刻工艺制作电极图形,AuGe/Ni/Au/Ag用于正面电极,厚度约为 $6\text{ }\mu\text{m}$,Ag/Au用于背面电极,厚度约为 $3\text{ }\mu\text{m}$.选择性湿法腐蚀工艺去除栅线间的GaAs欧姆接触层,之后蒸镀 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 双层减反膜以降低电池表面入射光损失.制作成的电池芯片分别使用Enlitech EQE系统和Spectrolab X-25太阳模拟器来表征其外量子效率(EQE)和 I - V 特性,使用ELV-8型号高能电子加速器来模拟空间电池在轨运行遭受的电子辐照环境,用于表征电池的抗辐射性能.

3 实验结果与讨论

3.1 倒装三结太阳能电池特性

在GaAs衬底上外延生长高效率GaInP/GaAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 倒装三结太阳能电池结构时,GaInP顶电池和GaAs中电池为晶格匹配外延生长,容易获得较好的光电特性.继续外延生长晶格失配的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 材料,过大的晶格失配度将会导致 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 体内出现大量的穿透位错等缺陷,作为非辐射复合中心,从而大大降低少数载流子的扩散长度,严重影响 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 子电池的光电特性.为了解决上述问题,本文采用In组分阶梯型渐变的AllnGaAs应力渐变缓冲层来提高底电池的晶体质量和光电性能.

如图1(b)所示,本文中AllnGaAs应力渐变缓冲层由11层材料组成,其中目标层厚度约为 $1\text{ }\mu\text{m}$,overshoot层厚度约 800 nm ,而overshoot层以下每层材料厚度大约 350 nm .Overshoot层具有最高的In组分和较厚的厚度,从而可以有效平衡应力渐变缓冲层的内应力,抑制穿透位错向目标层的延伸.使用HRXRD测试AllnGaAs应力渐变缓冲层非对称(115)晶面上的倒易空间图谱,图2结果显示应力渐变缓冲层的晶格弛豫度约100%,即 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{GaAs}$ 目标层的垂直晶格常数 a_{\perp} 与水平晶格常数 a_{\parallel} 基本相等,目标层处于非应力状态.(004)和(115)面的XRD摇摆曲线结果显示,目标层的半高宽分别为 117 arcsec 和 147 arcsec ,而晶格匹配GaInP/GaAs双结子电

池的半高宽分别为 73 arcsec 和 78 arcsec ,前者与后者的比值分别为1.6和1.9,较小的半高宽比值说明AllnGaAs应力渐变缓冲层具有优化的材料结构、生长条件以及良好的晶体质量,这为后续生长高晶体质量的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 底电池奠定了基础.

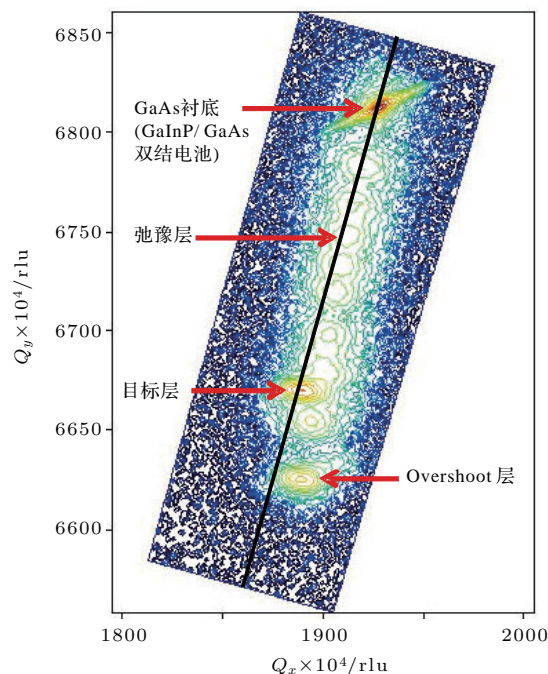


图2 (网刊彩色) HRXRD测试AllnGaAs应力渐变缓冲层(115)晶面上的倒易空间图谱

Fig. 2. (color online) HRXRD reciprocal space map of AllnGaAs graded buffer using the asymmetric (115) glancing exit reflection.

CL测试可以更为直接地反映应力渐变缓冲层穿透位错密度的大小.本文在4英寸倒装三结电池外延片整面上选择了3处,平边、中心和圆边,分别测试该处应力渐变缓冲层的CL,以判断整个外延片穿透位错密度的分布和大小(如图3所示).3处CL图片结果显示,平边和中心处的穿透位错密度相近,分别为 $3 \times 10^6/\text{cm}^2$ 和 $4.5 \times 10^6/\text{cm}^2$,而圆边处的穿透位错密度稍大,约 $8.8 \times 10^6/\text{cm}^2$,外延片整面的穿透位错密度平均约为 $5.4 \times 10^6/\text{cm}^2$,这一结果与Emcore公司的报道相似[8,13].另外,CL测试并没有探测到晶格匹配GaInP顶电池和GaAs中电池的穿透位错,而据Emcore公司报道,其生长的倒装三结电池中晶格匹配GaAs子电池具有密度约 $5 \times 10^5/\text{cm}^2$ 的穿透位错[13].较优的实验结果表明,本文获得的应力渐变缓冲层在外延生长过程中底层穿透位错不会大量向下扩散,从而保证了GaAs中电池具有较高的晶体质量.

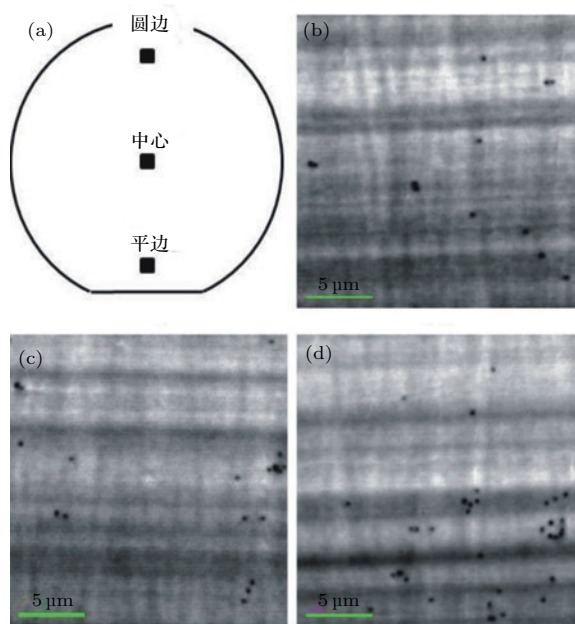


图3 (a) 4英寸外延片上取(b)平边、(c)中心、(d)圆边共3处, 分别测试该处应力渐变缓冲层的CL谱
Fig. 3. CL images of AlInGaAs graded buffer in (a) three areas across the 4 inch wafer, (b) flat, (c) center and (d) round.

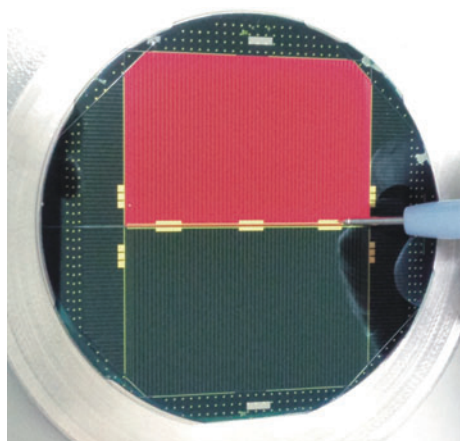


图4 (网刊彩色) GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池的EL测试结果
Fig. 4. (color online) EL image of inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As triple-junction solar cell.

使用 Au-Au 键合工艺将倒装三结电池外延层键合到 Si 片上, 通过键合条件的优化和键合界面洁净度的控制, 外延层与 Si 片之间键合状况良好, 无明显外延层脱落问题, 同时电致发光(EL)测试结果显示制作成的电池芯片发光均匀, 无明显缺陷(如图4所示). 图5(a)为 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池的 EQE 曲线. 与 GaInP/InGaAs/Ge 常规三结太阳能电池相比^[14], 倒装三结太阳能电池子电池具有相似的光谱响应强度, 而外延生长条件的精确

控制使得顶中子电池短波响应与常规三结电池基本一致. 与 GaAs 衬底完全晶格匹配, 倒装三结太阳能电池中 GaInP 顶电池和 GaAs 中电池具有相对较低的 In 组分和较大的禁带宽度, 使得两个子电池吸收边产生了不同程度的蓝移, 从而导致顶中子电池的积分电流密度相对较低, 分别为 16.8 和 17.1 mA/cm². In_{0.3}Ga_{0.7}As 底电池的吸收边约为 1265 nm, 禁带宽度约为 0.98 eV, 平均穿透位错密度约 $5.4 \times 10^6/\text{cm}^2$ 情况下其积分电流密度达到了 18.6 mA/cm². 单倍、AM0、25 °C 测试条件下, 面积 24 cm² 的 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池 I-V 特性曲线显示其开路电压达到 3.045 V, 转换效率达到 32%, 如图 5(b) 所示. 与 GaInP/InGaAs/Ge 常规三结太阳能电池相比^[14],

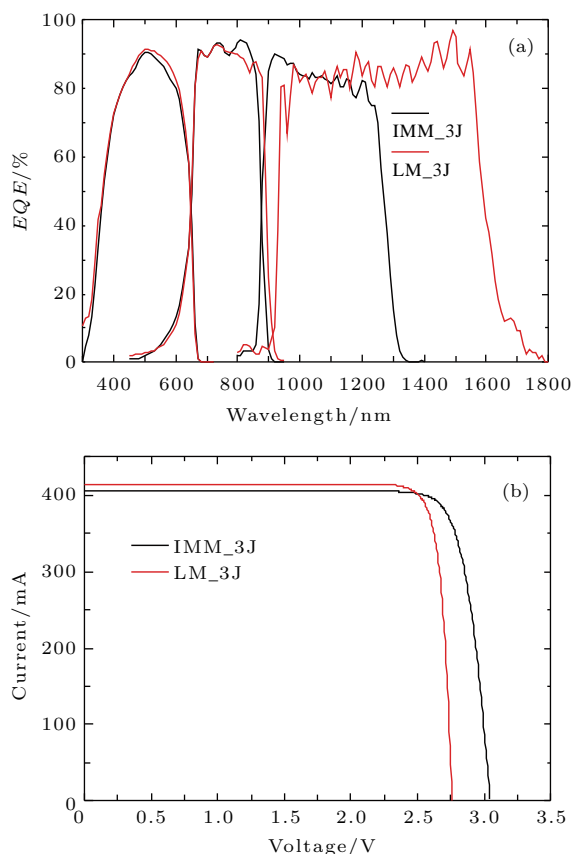


图5 (网刊彩色) 单倍、AM0、25 °C 测试条件下, 面积 24 cm² 的 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池和 GaInP/InGaAs/Ge 常规三结太阳能电池的 (a) EQE 曲线和 (b) I-V 特性曲线
Fig. 5. (color online) (a) EQE and (b) I-V curves of inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As triple-junction solar cell under one sun, AM0 spectrum, 25 °C, in comparison with that of lattice-matched GaInP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell with 24 cm² area.

表1 面积 24 cm² 的 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池和 GaInP/InGaAs/Ge 常规三结太阳能电池的 *I-V* 特性参数比较

Table 1. *I-V* characteristics of inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As and lattice-matched GaInP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell with 24 cm² area.

Cell structure	V_{oc}/V	I_{sc}/mA	V_m/V	I_m/mA	$FF/\%$	$Eff/\%$
倒装三结太阳能电池	3.045	404.5	2.691	386.7	84.5	32.0
常规三结太阳能电池	2.753	413.6	2.476	400.2	87.0	30.5

倒装三结太阳能电池的开路电压 (V_{oc}) 提高了 10%, 短路电流 (I_{sc}) 减少了 2%, 填充因子 (FF) 降低了 3%, 最终转换效率 (Eff) 提高了 5%, 具体数据如表 1 所列.

3.2 抗辐射性能

在空间环境中多结电池将不可避免地受到高能粒子辐射, 如高能电子和高能质子等, 使得电池材料内部产生大量缺陷, 少数载流子扩散长度和寿命降低, 自由载流子浓度降低, 界面复合速率增大, 光生载流子的收集效率降低, 暗电流增加, 最终导致电池性能的衰落.

为了评估 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池的抗辐射能力, 本文采用了国际通用的辐照条件即能量 1 MeV 高能电子, 辐照通量为 $1 \times 10^{11}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 同时分三种不同辐照总剂量 ($1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 和 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$) 对三结电池进行辐照测试. 表 2 列出了不同辐照总剂量下倒装三结电池 *EQE* 和 *I-V* 特性参数的辐照维持因子, 结果显示随着辐照总剂量的增加, GaInP 顶电池 *EQE* 辐照维持因子从 99.8% 逐渐降低为 99.6%, 变化量较小, GaAs 中电池 *EQE* 辐照维持因子从 99.7% 逐渐降低为 93.0%, 变化量相对较大, 而 In_{0.3}Ga_{0.7}As 底电池 *EQE* 辐照维持因子从 97.0% 逐渐降低为 85.8%, 变化量最大. 三结电池中 In_{0.3}Ga_{0.7}As 底电池具有较高的位错密度和较差的晶体质量, 这使得其抗辐射能力在三结电池中表现最差, 故而显示了最大的辐照衰落比例, 同时也使得三结电池从辐照前顶电池限流转变成辐照后底电池限流, 严重降低了倒装三结电池辐照后的转换效率. 根据文献 [8], Emcore 公司也报道了相似的辐照结果. 图 6 显示了不同电子辐射总剂量下 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池的 *EQE* 曲线, 可以看出随着辐照总剂量的增加, 三个子电池的 *EQE* 衰退均主要来自于长

波段, 且子电池辐照维持因子越小, 长波段光谱响应衰落越明显. 根据文献 [15] 的理论研究结果, 高能电子辐照将导致电池体内缺陷增加, 作为复合中心严重减小少数载流子的扩散长度, 降低光生载流子的收集效率, 最终导致长波段光谱响应的降低.

对于 *I-V* 特性参数, 随着辐照总剂量的增加, 倒装三结电池的 I_{sc} , V_{oc} 和 Eff 的辐照维持因子均逐渐减小, 而 FF 基本保持恒定, 其中 I_{sc} 辐照维持因子从 99.2% 逐渐降低为 94.6%, V_{oc} 辐照维持因子从 95.4% 逐渐降低为 89.3%, 而 Eff 辐照维持因子从 95.5% 逐渐降低为 85%, 这与文献 [12] 的报道结果相似. 三结电池的 I_{sc} 通常由三个子电池电流的最小值决定, 因此辐照情况下 I_{sc} 的辐照衰落取决于三个子电池光谱响应的衰落. 根据等效电路模型, 太阳电池的开路电压如下式:

$$V_{oc} = R_{sh} \left\{ I_{sc} - J_{01} \left[e \left(\frac{qV_{oc}}{KT} \right) - 1 \right] - J_{02} \left[e \left(\frac{qV_{oc}}{2KT} \right) - 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

其中, R_{sh} 为电池并联电阻, J_{01} 和 J_{02} 为电池漏电流, K 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度. 由此可知, 电子辐照过程中辐照缺陷导致了电池漏电流的增加, 并联电阻降低, 从而使得电池 V_{oc} 产生衰落. 最终在 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 辐照总剂量下实现 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池辐照后转换效率约 27.2%, 辐照维持因子约 85.0%, 辐照衰落约 15%. 为了进一步提升 In_{0.3}Ga_{0.7}As 底电池的抗辐照能力, 降低倒装三结电池的辐照衰落比例, 后续将重点针对 In_{0.3}Ga_{0.7}As 底电池晶体质量和电池结构进行优化. 通常情况下, 降低 InGaAs 底电池的 In 组分和晶格失配度, 可以有效降低应力渐变缓冲层的外延生长难度, 有利于获得较高质量的底电池, 然而底电池 In 组分的降低也将导致电池吸收光谱变窄, 电流减小, 因此最佳的底电池 In 组

分需要进一步实验验证. 通过不断优化 AlInGaAs 应力渐变缓冲层结构, 如掺杂浓度、In 组分变化梯度、生长厚度等, 以及外延生长条件, 如生长温度、速率、V/III 等, 将有利于获得较高质量的应力渐

变缓冲层, 提高底电池晶体质量. 通过不断优化电池结构, 如掺杂浓度、掺杂分布、基区厚度, 以及外延生长条件, 也将有利于进一步提高底电池抗辐照性能.

表 2 能量为 1 MeV 电子、不同辐照总剂量下 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池 EQE 和 I-V 特性参数的辐照维持因子 Δ

Table 2. Remaining factors of EQE and I-V characteristics of inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As triple-junction solar cells as a function of 1 MeV electron fluence.

辐照总剂量	Δ_{EQE_Top}	Δ_{EQE_Mid}	Δ_{EQE_Bot}	$\Delta_{V_{oc}}$	$\Delta_{I_{sc}}$	Δ_{FF}	Δ_{Eff}
辐照前	1	1	1	1	1	1	1
$1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$	99.8%	99.7%	97.0%	95.4%	99.2%	100.7%	95.5%
$5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$	99.7%	96.5%	91.5%	91.6%	97.8%	100.4%	90.1%
$1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$	99.6%	93.0%	85.8%	89.3%	94.6%	100.5%	85.0%

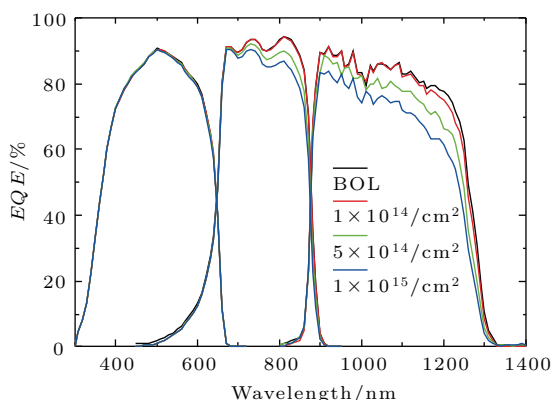


图 6 (网刊彩色) 能量为 1 MeV 电子时, 不同辐照总剂量下 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池的 EQE 衰减

Fig. 6. (color online) Degradation of EQE of inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As triple-junction solar cell under 1 MeV electron irradiation.

4 总 结

本文使用 MOCVD 外延生长技术, 在 4 英寸 GaAs 衬底上外延生长获得了空间用 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池. HRXRD 和 CL 测试结果显示倒装三结太阳能电池具有良好的晶体质量, 面内平均穿透位错密度达到 $5.4 \times 10^6/\text{cm}^2$. 经过外延芯片工艺的不断优化, 获得了高效率、大尺寸的倒装三结太阳能电池, 在单倍、AM0、25 °C 下面积 24 cm² 的三结电池转换效率达到 32%, 与 GaInP/InGaAs/Ge 常规三结太阳能电池相比转换效率提高了 5%. 在能量为 1 MeV 电子、不同辐照总剂量下研究了

GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As 倒装三结太阳能电池的抗辐射能力. 随着辐照总剂量的增加, GaInP 顶电池 EQE 辐照维持因子从 99.8% 逐渐降低为 99.6%, 变化量较小, GaAs 中电池 EQE 辐照维持因子从 99.7% 逐渐降低为 93.0%, 变化量相对较大, 而 In_{0.3}Ga_{0.7}As 底电池 EQE 辐照维持因子从 97.0% 逐渐降低为 85.8%, 显示了最大的变化量和最差的抗辐射能力, 使得三结电池从辐照前顶电池限流转变成辐照后底电池限流. 高能电子辐照后倒装三结电池转换效率的辐照维持因子也从 95.5% 逐渐降低, 最终在 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 辐照总剂量下达到 85.0%, 辐照衰降达到 15%, 辐照后转换效率衰降为 27.2%. 后续需要开展更多的实验研究, 尤其是针对 AlInGaAs 应力渐变缓冲层、In_{0.3}Ga_{0.7}As 底电池结构和外延生长条件的优化实验, 以进一步提高倒装三结太阳能电池的转换效率和抗辐射能力.

感谢上海空间电源研究所在电池性能表征方面给予的帮助, 感谢中国科学院新疆理化技术研究所在高能电子辐照测试方面给予的帮助.

参考文献

- [1] Ficcadenti M, Campesato R, Casale M, Gabetta G, Gori G, Kagan M, Kholev B A, Ivanov V 2014 *10th European Space Power Conference* Noordwijkerhout, Netherlands, April 13–17, 2014 p1
- [2] Guter W, Schöne J, Philipps S, Steiner M, Siefert G, Wekkeli A, Welsch E, Oliva E, Bett A, Dimroth F 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 223504

- [3] Fuhrmann D, Meusel M, Ebel L, Guter W, Kubera T, Köstler W, Strobl G 2013 *9th International Conference on Concentrator Photovoltaics* Miyazaki, Japan, April 15–17, 2013 p1
- [4] Wanlass M W, Albin D S 2004 *AIP Conf. Proc.* **738** 462
- [5] Wanlass M W, Ahrenkiel S P, Ahrenkiel R K, Albin D S, Carapella J J, Duda A, Geisz J F, Kurtz S, Moriarty T, Wehrer R J, Wernsman B 2005 *31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference* Florida, USA, January 3–7, 2005 p530
- [6] Geisz J F, Sarah Kurtz, Wanlass M W, Ward J S, Duda A, Friedman D J, Olson J M, McMahon W E, Moriaty T E, Kiehl J T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 023502
- [7] Cornfeld A B, Stan M, Varghese T, Diaz J, Ley A V, Cho B, Korostyshevsky A, Aiken D J, Sharps P R 2008 *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* California, USA, May 11–16, 2008 p1
- [8] Patel P, Aiken D, Boca A, Cho B, Chumney D, Clevenger M B, Cornfeld A, Fatemi N, Lin Y, McCarty J, Newman F, Sharps P, Spann J, Stan M, Steinfeldt J, Strautin C, Varghese T 2012 *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Austin, Texas, June 3–8, 2012 p110
- [9] Patel P, Aiken D, Chumney D, Cornfeld A, Lin Y, Mackos C, McCarty J, Miller N, Sharps P, Stan M 2012 *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Austin, Texas, June 3–8, 2012 p1
- [10] Takamoto T, Washio H, Juso H 2014 *40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Denver, USA, June 8–13, 2014 p1
- [11] Chumney D, Aiken D, Cho B, Cornfeld A, Diaz J, Ley V, Mittman J, Newman F, Sharps P, Stan M, Varghese T 2010 *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Hawaii, USA, June 20–25, 2010 p113
- [12] Boisvert J, Law D, King R, Rehder E, Chiu P, Bhusari D, Fetzer C, Liu X, Hong W 2013 *39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Florida, USA, June 16–21, 2013 p2790
- [13] Stan M, Aiken D, Cho B, Cornfeld A, Ley V, Patel P, Sharps P, Varghese T 2010 *J. Cryst. Growth* **312** 1370
- [14] Wang D X, Song M H, Bi J F, Chen W J, Li S L, Liu G Z, Li M Y, Wu C Y 2017 *Chin. Phys. Lett.* **34** 068801
- [15] Walters R J, Messenger S R, Cotal H R, Xapsos M A, Wojtczuk S J, Serreze H B, Summers G P 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 2164

Inverted metamorphic triple-junction solar cell and its radiation hardness for space applications*

Song Ming-Hui[†] Wang Du-Xiang Bi Jing-Feng Chen Wen-Jun Li Ming-Yang
Li Sen-Lin Liu Guan-Zhou Wu Chao-Yu

(Tianjin San'an Optoelectronics Co., Ltd, Tianjin 300387, China)

(Received 5 May 2017; revised manuscript received 7 June 2017)

Abstract

In recent years, with the development of solar cell technology, the conversion efficiency of the lattice-matched $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{Ge}$ triple-junction solar cell has achieved 30% under AM0 spectrum. As is well known, it is difficult to further improve the efficiency due to the limited bandgap combination. Therefore, an inverted metamorphic triple-junction solar cell is designed by replacing the Ge subcell with a 1.0 eV InGaAs subcell. The efficiency could be increased with the open-circuit voltage increasing, while the short circuit current maintains a similar value.

In this paper, the inverted metamorphic $\text{GaInP}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ triple-junction solar cells are grown on 4-inch GaAs substrates via metal organic chemical vapor deposition. Optimizing the epitaxy process, AlInGaAs graded buffer shows nearly 100% relaxation by the reciprocal space mapping of the high-resolution X-ray diffraction and low average threading dislocation density $\sim 5.4 \times 10^6/\text{cm}^2$ evaluated from the cathodoluminescence image. Finally, the inverted metamorphic triple-junction solar cell with 24 cm^2 area shows a conversion efficiency of 32% with an open-circuit voltage of 3.045 V and a short-circuit current of 404.5 mA under one sun, AM0 spectrum, 25°C conditions, which is 5% higher than the lattice-matched $\text{GaInP}/\text{InGaAs}/\text{Ge}$ triple-junction solar cell. Under 1 MeV electron irradiation test, the degradations of the external quantum efficiency and I - V characteristics of inverted metamorphic triple-junction solar cell are exhibited each as a function of fluence, and finally the end-of-life efficiency is 27.2% with a degradation of 15% under $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ fluence. More experiments mainly focusing on the lattice quality of AlInGaAs graded buffer and the structure of $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ subcell, will be carried out to improve the efficiency and enhance the radiation hardness.

Keywords: inverted metamorphic, space solar cell, electron radiation

PACS: 88.40.Hj, 84.60.Jt, 61.80.Fe

DOI: 10.7498/aps.66.188801

* Project supported by the Grand from Tianjin Little Giant Fund, China (Grant No. 14ZXJGX00400) and the Tianjin Science and Technology Support Plan, China (Grant No. 16YFZCGX00030).

[†] Corresponding author. E-mail: songminghui@sanan-e.com