

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, 武汉 430014;

2. 中国长江电力股份有限公司, 武汉 430014;

3. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 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 Jicheng¹, GUAN Weiwei², SUN Qiangjian³

(1. Three Gorges Power Company, Wuhan, 430014, China;

2. China Yangtze Power Co., Ltd., Wuhan, 430014, 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 substrates 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 luminescent 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 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 is 30.6%, achieving an efficiency of 34% under concentration. The results indicate that MBE can produce high-quality InGaAsP material, and 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

PACS:

引言

太阳能电池是一种将太阳光的光能转换为电能

的光电器件。由于太阳光谱的能量范围很宽, 分布在 0.4 eV-4 eV, 而单结太阳能电池其带隙是一定的,

收稿日期: 2024-12-21, Received date: 2024-12-21,

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 the Three Gorges Power Company, Wuhan, 430014, China; 2. 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

较短波长的光子利用率相对较低,长波长光子又无法吸收,导致存在效率极限^[1]。为了实现更高的光电转换效率,研究人员一直在致力于开发新型太阳能电池结构和制造方法。多结太阳能电池通过多个不同材料的pn结叠层组成,利用每个结构对不同波长的光进行吸收和转换从而具有较高的效率^[2-4]。在多结太阳能电池材料中,以第三族元素(如镓、铟)和第五族元素(如砷、磷)组成的III-V族化合物半导体材料具有优良的光电特性,包括高光吸收系数、直接带隙、较高的载流子迁移率和较低的复合速率等,是制备高效多结叠层太阳能电池的理想选择。

通过合理的带隙组合充分吸收太阳光,III-V族多结太阳能电池实现了非常高的光电转换效率^[5]。AM1.5G光谱下,传统的GaInP/GaAs/InGaAs三结太阳能电池已经实现了37.9%的效率^[5]。近期,基于量子阱结构中间电池的GaInP/GaAs(MQW)/GaInAs三结太阳能电池在AM1.5G和AM0光谱分别实现了39.5%和34.2%的效率^[3]。因性能稳定、抗辐射能力优越,III-V族太阳能电池在空间电源得到了广泛应用^[6-9]。

从理论上讲,通过合理的带隙组合,利用更多子电池合理的吸收太阳光谱可以实现更高的电池效率。然而,由于不同的材料的晶格常数不同,从实际材料生长的角度,多结结构的叠层太阳能电池外延生长是非常复杂的。GaInP/GaAs材料由于与GaAs衬底晶格匹配,且能够实现能量较高的可见光部分的吸收从而通常被用来作为顶层子电池。但是这种双结电池无法实现对近红外部分的光吸收,因此需要在此基础上底部叠层带隙更低的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(PV)器件中的吸收材料候选材料,也是多结叠层太阳能电池中第三节子电池的优秀材料^[12-15]。

三结及以上子电池的材料生长通常需要倒置失配外延生长(Inverted Metamorphic, IMM),利用失配缓冲层将晶格常数缓冲到所需带隙的材料晶格常数,缓冲层抑制位错等缺陷扩展至有源区^[15-17]。太阳能电池器件性能受材料质量影响较大,外延生长需要精细调配,否则可能对材料和器件的质量造成

不利影响,从而降低太阳电池效率^[18]。另一种灵活的方案是通过晶圆键合直接将不同材料的电池堆叠在一起键合成为单片多结太阳电池^[19, 20]。晶圆键合方法不仅能够保持每个结构的优异特性,而且还能够灵活地组合不同材料以实现最佳的光电转换性能。

本文研究了通过MBE在InP衬底上生长InGaAsP材料并对材料性能进行表征分析。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

实验使用的设备是Veeco公司的GEN 20A自动传送样品双腔MBE系统。本研究内容主要使用含磷化物和砷化物的III-V族化合物半导体材料生长腔室,配备砷和磷裂解炉。生长过程中利用反射式高能电子衍射仪RHEED进行原位监测,观察衬底脱氧情况,以及材料生长过程中的表面再构情况。当衬底温度达到一个临界温度时,表面的氧全部从衬底脱附,荧光屏上的斑点突然变的很亮,以此判断生长前的脱氧情况。材料生长过程中通过衍射图样观察表面再构。

GaAs和InP衬底采用免清洗衬底。GaAs衬底上生长GaInP通常在500℃-530℃,生长速率1 μm/h, V/III比为50。在材料生长前,在热处理腔室内在360℃下对衬底进行表面预处理1小时。然后传送到生长腔室,在生长室中对衬底升温,为了防止表面材料分解,InP衬底在磷(P₂)环境保护中继续升温到脱氧。红外测温计(pyro)495℃热脱附5分钟。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℃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组分比。

与三族源不同的是As和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。V族源磷的分子束流等效压力(BEP)为1.6-2.3×10⁻⁵ Torr,砷的为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与五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,In-

GaAsP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 $2.5\text{E-}03$ 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的寿命特征。图3是InGaAsP材料的温度依赖光致发光光谱(PL)以及时间分辨光致发光。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300K时,PL峰值能量为1.05 eV,符合设计的三结太阳电池带隙需求。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,还进行了时间分辨光致发光测试。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,生长并制备了InGaAsP单结太阳电池器件。图4是AM1.5G光谱下,InGaAsP太阳电池电流电压(I-V)特性。在1个太阳下的校准表明,InGaAsP太阳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,填充系数(FF)为75.3%。开路电压的带隙偏压为0.48 V。为了提高太阳电池的性能,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 三结太阳电池

三结太阳电池的典型结构如图5所示。每个子电池结构由p型基极层、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($3.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)和80 nm发射极层($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。GaAs电

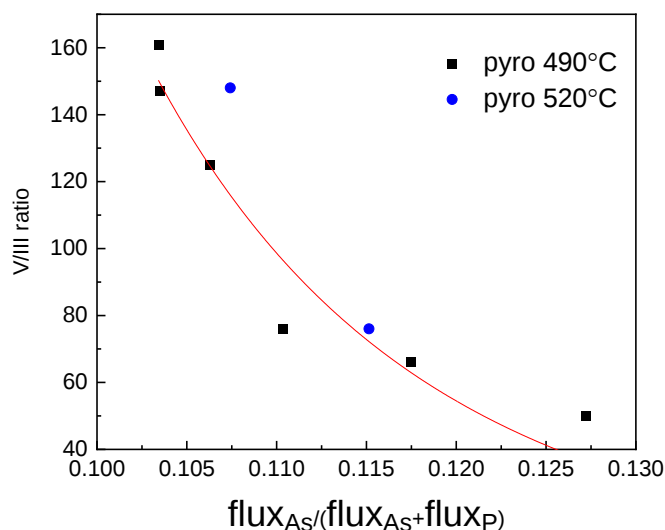


图1 InGaAsP中As源BEP比例与V/III的关系

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

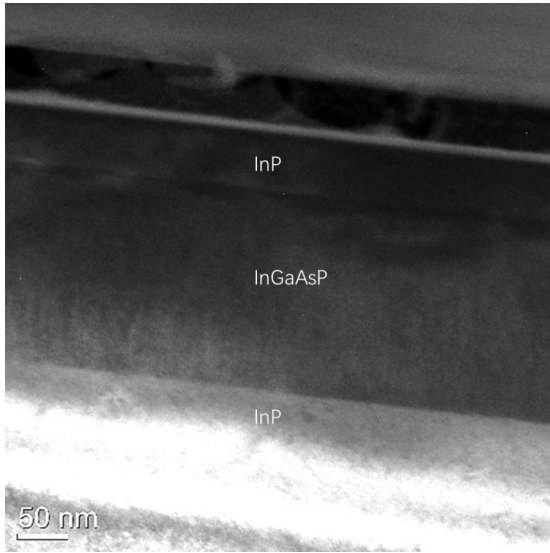


图2 InP衬底上InGaAsP材料的截面透射电镜

Fig. 2 Cross section TEM of InGaAsP on InP Substrate

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 Si掺

杂AlInP($4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)和30 nm 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。键合过程在配备氦离子枪

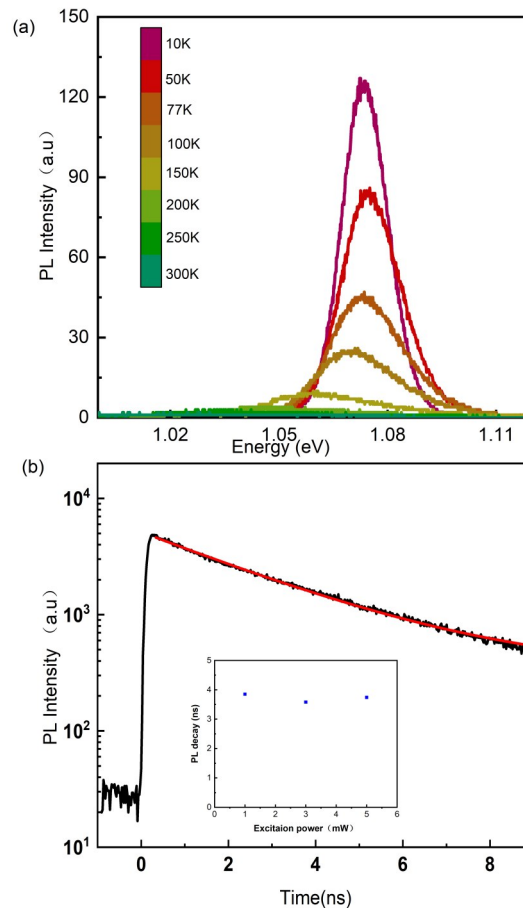


图3 InGaAsP材料的温度依赖光致发光光谱以及时间分辨光致发光

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

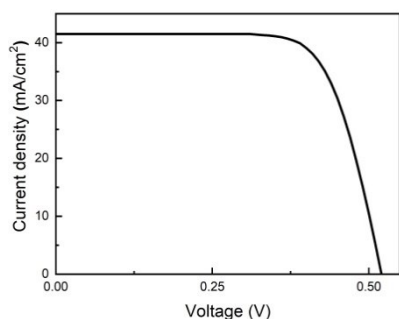


图4 InGaAsP太阳电池 I-V 特性

Fig. 4 I-V characteristics of InGaAsP solar cell

n ⁺ -GaAs contact 200nm
n ⁺ -AlInP window 25nm
n-GaInP emitter 80nm
p-GaInP base 750nm
p ⁺ -AlGaInP BSF 30nm
GaAs-TJ 30nm
n ⁺ -GaInP window 30nm
n-GaAs emitter 100nm
p-GaAs base 1000nm
p ⁺ -GaAs /p ⁺ -GaInP BSF
p ⁺ -GaAs bonding
n-InP bonding
n-InGaAsP emitter 200nm
p-InGaAsP base 2500nm
p-InP BSF 100nm
p ⁺ -InP 300nm buffer
p-InP substrate

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

的高真空($<10^{-5}$ 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,放入键合机内,抽真空。在真空环境中,用低能氦离子枪轰击两个待键合样品的表面,以激活表面使表面产生悬挂键。然后将这两个晶圆紧密接触,并向其施加压力,在5000N压力下,使两者粘合到一起。由于整个键合过程都是在高真空腔室内完成的,有效避免了外界环境中的水汽及其他杂质对键合界面的污染。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族太阳能电池工艺制作三结太阳能电池。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光伏I-V曲线。

采用晶圆键合技术制备的GaInP/GaAs/InGaAsP三结电池的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通常在晶格不匹配外延生长中出现的螺纹位错和平面缺陷。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,根据以下公式可以计算出各个子电池的电流密度。

$$J_{sc} = \frac{e}{hc} \int_{(\lambda)} I_{irr} * \lambda * EQE d\lambda$$

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分别为10.7 mA/cm²。从测试结果表明InGaAsP和GaAs子电池的短路电流密度相当,而GaInP子电池的电流密度比二者高的比较多。而量子效率与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

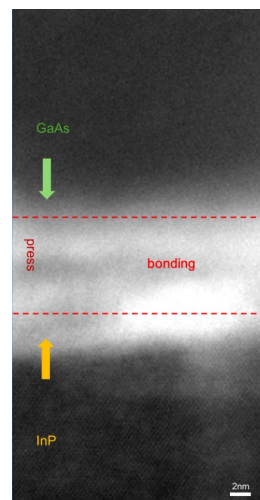


图6 键合界面图

Fig. 6 STEM image of bonded triple junction solar cell

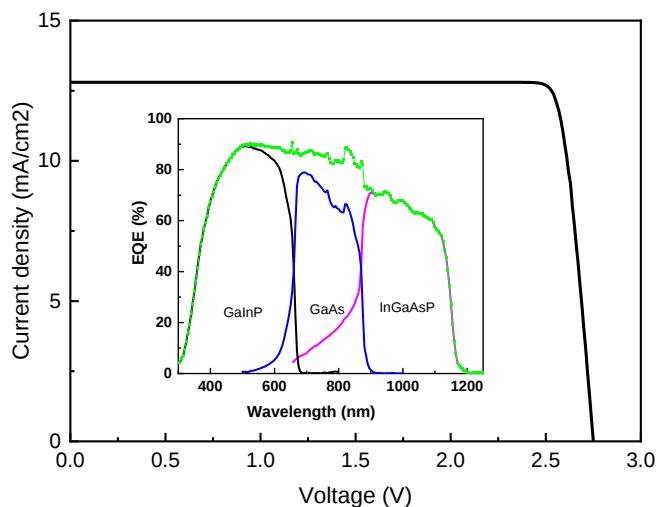


图7 键合三结太阳能电池J-V特性及量子效率(插图)

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

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 830nm、1100nm 和 2700nm。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。该电池在聚光下具有良好的性能,说明该键合方式能适用于高电流。

尽管已经实现了较高的聚光效率,该三结电池的聚光效率还有进一步提升的空间。其性能优化主要取决于两个方面:从电极工艺的角度来看,由于单个太阳下的太阳电池需要较小的电极遮蔽,该电池在工艺设计上采用的阴影比例为5%,电极之间的距离稀疏。而聚光太阳电池需要更小的串联电阻和相对更密集的电极布局以满足大电流下的

电流收集。大电流下电极的电流收集需要更短的电流路径是聚光下本 GaInP/GaAs/InGaAsP 三结太阳能电池效率的提升不剧烈的主要原因。进一步提高电池效率需要减少阴影比例,缩短横向扩展电阻。从电流匹配的角度来看,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。

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%。

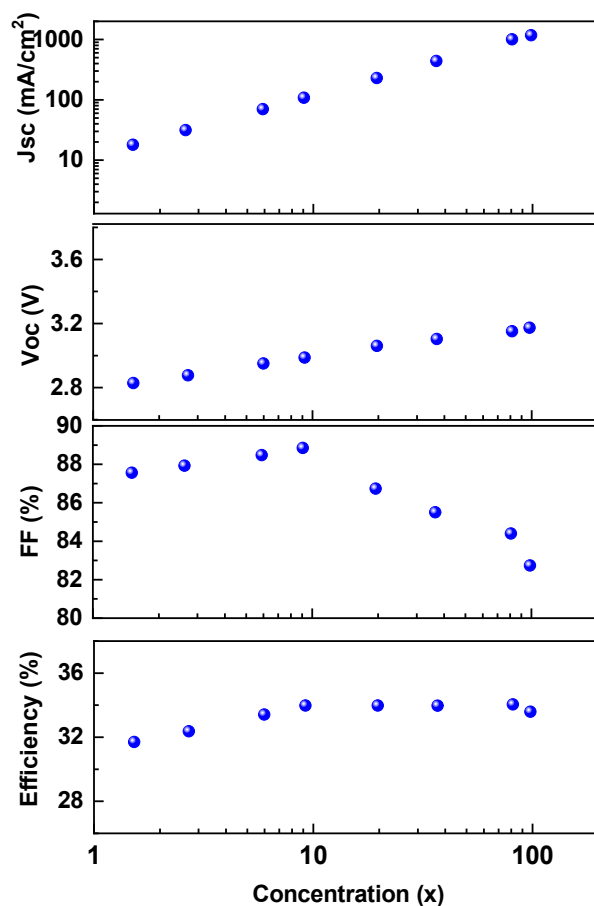


图8 聚光下三结太阳电池性能随着倍数的变化

Fig. 8 Jsc, Voc, efficiency and FF of the triple-junction solar cell under concentration

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)

参考文献

- [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] 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]. Prog Photovolt Res Appl. 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] 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 H B, Li X Y, Li G. 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 Y F, Wang W J, Sun J H. 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] 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 X F, Yang W X, Long J H, et al. Electroluminescence explored internal behavior of carriers in InGaAsP single-junction solar cell [J]. Chin. Phys. B 2023, 32 (1) : 539-544.
- [14] 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 ultraviolet 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]. Sol. Energy Mater. Sol. 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] 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]. Appl.phys.express, 2014, 7(11): 112301.
- [24] Yang W X, Pan D, 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.