

In_xGa_{1-x}As 材料在多结空间太阳能电池中的应用进展

张炜楠¹, 涂洁磊^{1,2}, 胡凯¹, 李雷¹, 孙晓宇¹, 姜德鹏³, 沈静曼³

(1. 云南师范大学 太阳能研究所, 云南 昆明 650500; 2. 云南师范大学 云南省农村能源工程重点实验室, 云南 昆明 650500; 3. 上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘要: In_xGa_{1-x}As 材料具有独特的物理特性, 可以通过调节 In 和 Ga 的组分来改变材料的带隙宽度 E_g 。该材料自进入多结空间太阳能电池领域以来, 就受到了广泛的关注。因此, In_xGa_{1-x}As 材料有望成为未来多结空间太阳能电池领域中的重要研究对象。本文首先介绍了 InGaAs 材料的生长工艺及其在多结空间太阳能电池领域中的应用情况和研究现状, 同时讨论了材料的外延生长工艺以获得高质量含 InGaAs 材料的多结太阳能电池。此外, 介绍了近年来 InGaAs 材料在高效多结空间太阳能电池领域的研究进展, 并对其抗辐照性能进行了简述。大量研究表明: InGaAs 材料的使用可以进一步提升多结空间太阳能电池的光电转换效率, 达到提升卫星有效载荷的目的。

关键词: In_xGa_{1-x}As 材料; 多结空间太阳能电池; 外延生长工艺; 抗辐照性能

中图分类号: TM 914

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.02.015

Application Progress of In_xGa_{1-x}As Materials in Multi-junction Space Solar Cells

ZHANG Weinan¹, TU Jielei^{1,2}, HU Kai¹, LI Lei¹, SUN Xiaoyu¹,
JIANG Depeng³, SHEN Jingman³

(1. Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China;

2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Rural Energy Engineering, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China; 3. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: In_xGa_{1-x}As materials have unique physical properties. Their band gap width E_g can be changed by adjusting the compositions of In and Ga. Since the entrance into the field of multi-junction space solar cells, In_xGa_{1-x}As materials have received extensive attentions. In_xGa_{1-x}As materials are expected to be important research objects in the field of multi-junction space solar cells in the future. In this paper, the growth process of InGaAs materials and their application and research status in the field of multi-junction space solar cells are introduced in detail. Meanwhile, the epitaxial growth process of materials is discussed to obtain high-quality multi-junction solar cells containing InGaAs materials. In addition, the research progress of InGaAs materials in the field of efficient multi-junction space solar cells in recent years is introduced, and their performance of irradiation resistance is also briefly introduced. A large number of studies have shown that the use of InGaAs materials can further improve the photoelectric conversion efficiency of multi-junction space solar cells and achieve the purpose of improving satellite payloads.

Key words: In_xGa_{1-x}As material; multi-junction space solar cell; epitaxial growth process; performance of irradiation resistance

0 引言

GaInP (1.90 eV)/GaAs (1.42 eV)/Ge (0.67

eV)三结太阳能电池具有转换效率高(约为 Si 太阳能电池的 2 倍)、抗辐照性能优良、温度特性好以及晶格

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61664010)

作者简介: 张炜楠(1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为高效 III-V 族多结太阳能电池。

通信作者: 涂洁磊(1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为高效 III-V 族多结太阳能电池。

匹配易于规模化生产等优势,已全面取代Si太阳能电池成为空间飞行器的主要电源^[1-2]。经过10多年的发展,其转换效率已达到32%(AM0,1 sun)和42%(AM1.5,508 suns)^[3-4],接近三结太阳能电池的理论转换效率极限。但由于GaAs(1.42 eV)与Ge(0.67 eV)的带隙差较大,一部分能量以热的方式在Ge子电池中散失^[5],因此,需要找到一种带隙为1.0 eV的材料来弥合这个带隙差。为了进一步提高多结空间太阳能电池的转换效率,需要通过调节其带隙组合以实现子电池对整个太阳光谱的合理利用^[6]。大量理论研究表明,带隙组合为1.9/1.42/1.0/0.7 eV的四结太阳能电池能够获得更好的电流匹配,在AM0条件下理论转换效率可达38%~42%^[7]。因此,找到带隙宽度为1.0 eV和0.7 eV的子电池材料便成为近年来多结空间太阳能电池的研究热点之一。

GaAs是目前人们研究最透彻、应用最广泛的III-V族半导体之一,其作为直接带隙半导体,具有1.42 eV的带隙宽度。GaAs材料与太阳光谱匹配度好,是一种理想的太阳能电池材料^[8]。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料作为三元合金III-V族半导体材料,因其具有带隙可调、响应波段广、吸收系数大等物理特性,近年来成为多结空间太阳能电池材料的研究方向之一。

目前InGaAs材料的报道主要集中在激光探测器领域,而在多结太阳能电池领域中报道较少,相关综述文献更少。本文根据目前已经发表的文献报道,系统讨论了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的外延生长以及在多结空间太阳能电池领域中的应用,并对InGaAs材料未来的发展趋势进行了展望。

1 InGaAs材料的理论基础

1.1 InGaAs材料的基本性质及其参数

材料的选取对于制备高效多结空间太阳能电池非常重要^[9],尤其是在目前传统三结空间太阳能电池的转换效率已经接近其理论极限的情况下,开发并使用一种新型材料对制备多结空间太阳能电池就变得尤为关键^[10]。InGaAs被认为是未来制备多结空间太阳能电池的重要材料之一,下面简单介绍InGaAs材料的基本性质及其参数。

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料属于直接带隙III-V族半导体材料,其具有闪锌矿立方晶体结构。闪锌矿立方晶体结构如图1所示,它是由两个面心立方晶格沿体对

角线方向平移1/4长度套构而成。InGaAs材料的能带结构如图1所示,右上插图显示了X、L、 Γ 随In的组分 x 的变化关系^[11]。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的一些相关物理性质及电学参数见表1和表2^[12]。

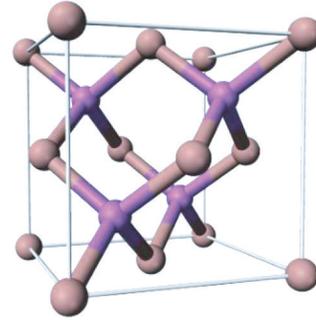


图1 闪锌矿立方晶体材料结构示意图

Fig.1 Structure diagram of sphalerite cubic crystal material

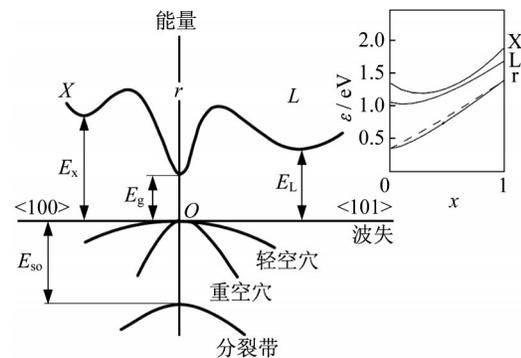


图2 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的能带结构示意图,以及X、L、 Γ 随In的组分的变化关系^[11]

Fig.2 Schematic diagram of the band structure of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ materials and the relationship of X, L, and Γ with the composition of In^[11]

表1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料性质以及常用参数^[12](25 °C)

Tab.1 Properties and common parameters of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ materials^[12](25 °C)

材料性质及参数	数值
晶体结构	闪锌矿立方晶体结构
1 cm ² 中的原子数	$(0.83x+2.76)\times 10^{22}$
密度/(g·cm ⁻³)	$(0.37x+5.31)$
电子有效质量 m_e/kg	$(0.003x^2-0.043x+0.063)m_0$
重空穴有效质量 m_{ph}/kg	$(0.51-0.1x)m_0$
轻空穴有效质量 m_{pl}/kg	$(0.082-0.056x)m_0$
带隙类型	直接带隙
带隙宽度 E_g/eV	$(0.45x^2-1.53x+1.43)$
晶格常数/(10 ⁻¹⁰ m)	$(5.6536+0.4054x)$

表 2 In_xGa_{1-x}As 材料相关电学参数^[12](25 °C)Tab. 2 Electrical parameters of In_xGa_{1-x}As materials^[12](25 °C)

电学参数	数值
电子迁移率/(cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)	(49.2x ² -17.7x+8.5)×10 ³
空穴迁移率/(cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)	300~400
电子扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)	(12.3x ² -4.4x+2.1)×10 ²
空穴扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)	7~12
介电常数(静态)	0.67x ² +1.53x+12.9
介电常数(高频)	1.4x+10.9

由于 InGaAs 材料中 In 和 Ga 都是 III A 族元素,所以 In 和 Ga 可以由任意比例组成。In_xGa_{1-x}As 的禁带宽度随组分 x 的增大而减小,从 GaAs 的 1.42 eV 直至 InAs 的 0.35 eV 之间连续可调;但其晶格常数却随组分 x 的增大而增大,从 GaAs 的 5.6533×10^{-10} m 直至 InAs 的 6.0583×10^{-10} m,同时材料的响应波长可以在 870~3 500 nm 之间连续调节,很好地覆盖了太阳能电池需要的可见光长波波段^[13]。但 InGaAs 材料的少数载流子寿命随 x 的变化而减小,在太阳能电池中,少数载流子寿命对电池的光电转换效率有着至关重要的影响。由于扩散长度与少子寿命有关,因此,对于禁带宽度为 1.0 eV 和 0.7 eV 子电池的厚度分配,就成为该种太阳能电池是否具有高转换效率的关键因素之一^[14]。

综上所述,InGaAs 材料不仅可以改变材料本身的禁带宽度,响应波长也非常适合太阳能电池的吸收光谱,进而开辟了制备多结空间太阳能电池的新途径。与此同时,InGaAs 材料可以通过 MOCVD、MBE 等设备进行材料生长,其生长出的材料均匀性和稳定性良好,因此,InGaAs 材料是制备多结空间太阳能电池可选材料之一。

1.2 InGaAs 材料的晶格失配现象

在材料生长的过程中,当衬底的晶格常数与外延层的晶格常数不匹配时,就会产生晶格失配现象^[12]。晶格失配几乎在任何异质外延中都会发生^[15]。In_xGa_{1-x}As 材料在 In 的组分为 0.30 时,其禁带宽度为 1.0 eV;在 In 的组分为 0.58 时,其禁带宽度为 0.7 eV,然而 In_{0.3}Ga_{0.7}As 与 Ge 和 GaAs 晶格失配度约为 2%,与 In_{0.58}Ga_{0.42}As 晶格失配度约为 3%,所以生长出高质量的 In_{0.3}Ga_{0.7}As (1.0eV) 和 In_{0.58}Ga_{0.42}As (0.7eV) 材料较为困难。

晶格失配一般定义为

$$\epsilon_0 = \frac{a_e - a_s}{a_s} \quad (1)$$

式中: a_e 为外延层的晶格常数; a_s 为衬底的晶格常数。

半导体异质外延技术使得人类可以按照自己的想法,通过控制一种材料的组分来实现我们需要的电学功能和性能,它是实现各种新型光电结构器件的基础^[16]。但伴随着异质外延的发展,晶格失配就成为我们不能忽视的一个问题。晶格失配会直接导致应力和形变的产生,使得外延材料的质量下降,从而降低了电池的性能。目前通过引入缓冲层(Buffer Layer)来释放应力并适配位错,是目前国内外解决 InGaAs 材料的晶格失配问题的主要手段之一^[17]。

2 InGaAs 材料生长

InGaAs 材料最初被应用于红外探测器^[18]。2002 年,Makiuchi 等报道了 InGaAs/InP 背面入射光电探测器,由于 InGaAs 材料的电子迁移率可以达到 $12\,000\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,该探测器表现出优异的高速响应特性。2001 年,日本 Takamoto 等^[19]采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在 Ge 衬底上生长 InGaP/In_{0.01}Ga_{0.99}As 太阳能电池,In_{0.01}Ga_{0.99}As 替代 GaAs 作为中间电池,使其晶格与 Ge 衬底具有更好的匹配。同时 In_{0.01}Ga_{0.99}As 拓展了中间电池对光谱的吸收,提高了短路电流。目前,外延生长 In-GaAs 材料的技术主要有 MOCVD 和分子束外延(MBE)。

2.1 MOCVD 生长

MOCVD 技术具有高产量、高质量的优点,适用于规模化生产,因此,目前商用空间太阳能电池的生产多采用 MOCVD 技术。2004 年,Spectrolab 公司采用 InGaAs 材料首次制备了 (Al)GaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/Ge 6 结太阳能电池,其电池转换效率为 23%,开路电压为 5.3 V^[20]。

但是通过 MOCVD 技术生长高质量的 InGaAs 还面临着许多困难。一方面由于 MOCVD 生长 In-GaAs 材料需要较高的生长温度,同时该材料对温度又极其敏感,1 °C 的温度变化就会使带隙产生漂移,因此,控制生长温度对于制备高质量的 InGaAs 材料非常重要。1986 年,Amano 等^[21]首次提出了两

步生长法,即低温条件下在衬底与外延层之间生长一层组分固定的缓冲层,之后在高温条件下生长外延层。低温生长的缓冲层为外延层提供成核中心,成为外延层的模板,在释放应力的同时把晶格失配的应变限制在缓冲层内,降低材料的失配位错密度。高温生长外延层的过程中,使缓冲层进行重结晶,提高了外延层的质量。这种方法不仅在技术上更加简单,在生长过程中也更容易控制,是实现高质量 InGaAs 材料生长的一种有效途径。此外,MO 源带来的 C 污染是 MOCVD 生长 InGaAs 材料的另一方面困难。非故意掺杂的 C 背景浓度高达 10^{17} cm^{-3} ,相关的缺陷导致 InGaAs 材料的光学和电学性能的退化。为解决此问题,采用退火工艺可以减少材料相关缺陷的浓度^[22]。

2.2 MBE 生长

MBE 可以实现 InGaAs 的低温外延生长,且由于不需要使用含 C 的生长源,可以有效地避免 C 污染的问题,是制备高质量 InGaAs 材料的另一有效方法。目前使用 MBE 方法生长的多结空间太阳能电池的 InGaAs 子电池的电流密度,可以与其他子电池进行良好的匹配。

华南理工大学探究了 MBE 技术下掺杂浓度、基底温度等对 InGaAs 材料质量的影响,实验结果显示,在 GaAs 衬底上生长单结 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 电池在

AM0 非聚光条件下获得了良好的电学效果^[23]。德国 Fraunhofer^[24] 使用 MEB 技术生长的 InGaP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池,获得了 714.8 mA 的短路电流和 44.4% 的转换效率。MBE 技术由于其生长工艺复杂,生产成本较高,因此,在产业化发展方面需要进行进一步优化。

3 InGaAs 材料在空间太阳电池中的应用

3.1 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 材料在空间太阳电池中的应用

在 2009 年第三十四届国际光伏专家会议(PVSC)上,Spectrolab 公司报道了光电转换效率为 31.7% 的含有 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 材料的键合三结太阳电池^[25]。2010 年,日本 Sharp 公司^[26] 报道的 InGaP/GaAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (1.0 eV) 倒装结构三结太阳电池转换效率达到 32%,实现了当时三结太阳电池的效率突破。然而该芯片面积仅为 1 cm^2 ,并且由于 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 底电池缺陷影响,其转换效率随时间逐渐下降。3 年后,日本 Sharp 公司改进后的倒装结构三结太阳电池光电转化效率为 37.9%,这也是迄今为止倒装三结太阳电池的最高效率^[3]。

日本 Sharp 公司 Takamoto^[27] 等提出的 InGaP/GaAs/InGaAs(1.0eV) 倒装(IMM)结构三结太阳电池,在 AM1.5 条件下实现了 37.9% 的高转换效率,其基本结构与电池 I - V 曲线如图 3 所示。

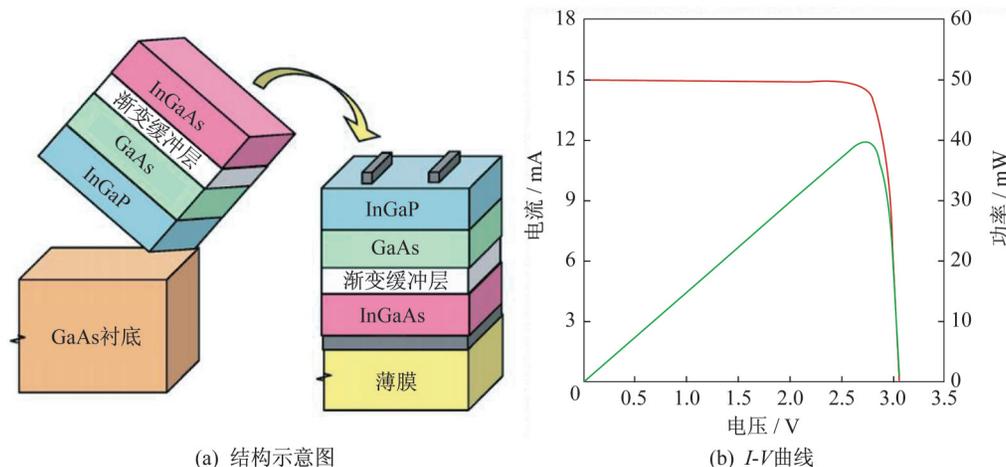


图 3 InGaP/GaAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (1.0eV) 倒装三结太阳电池结构示意图和 I - V 曲线^[27]

Fig.3 Structure diagram of InGaP/GaAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (1.0 eV) IMM 3J solar cells and I - V curves^[27]

该种太阳电池效率提升的主要原因有:1) 通过降低隧穿结的串联电阻使得电池的填充因子(FF)提升;2) 通过优化减反射膜及窗口层提升短路电流

密度(J_{sc});3) 通过改变组分 x 增加底电池 InGaAs 的带隙 E_g (1.0 eV) 提升电池的开路电压(V_{oc})^[26]。

2013 年厦门乾照报道了采用阶变缓冲层技术

(step-graded)外延生长了具有更优带隙组合的GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As(1.0 eV)倒装三结太阳能电池,在AM0的条件下获得了32.64%的转换效率^[15]。由于采用了渐变缓冲层技术,使得外延材料的表面形貌得到了良好的改善,如图4所示。2018年上海空间电源研究所报道了大面积、高性能柔性GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As三结太阳能电池,转换效率达31.5%(AM0)^[28]。目前,含有In_{0.3}Ga_{0.7}As材料的倒装三结太阳能电池具有较高的转换效率,其制备技术也日渐成熟,得到产业界的广泛认同,有望成为产业界下一代高效多结空间太阳能电池产品。

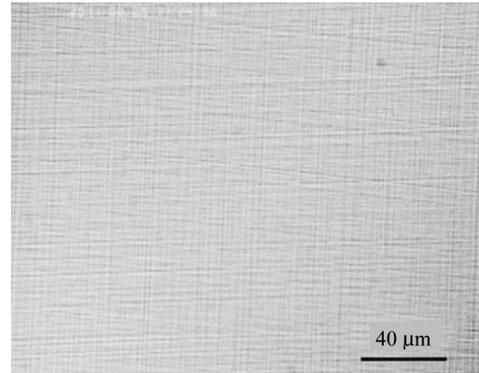


图4 显微镜下倒装三结电池外延材料表面形貌^[15]

Fig.4 SEM surface morphology of the epitaxy material for IMM 3J solar cell^[15]

3.2 In_{0.58}Ga_{0.42}As材料在空间太阳能电池中的应用

2012年,Patel^[29]等报道了InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As四结空间太阳能电池,在AM0条件下获得了34.5%的转换效率。该种太阳能电池最显著的特点是通过改变In和Ga的组分调节带隙,分别制成第三结和第四结子电池,并且对可

见光谱的吸收进行了优化,同时通过优化梯度层(grade layer)以减少螺旋位错^[30]。含有In_{0.58}Ga_{0.42}As(0.7 eV)材料的倒装四结空间太阳能电池结构示意图及其I-V曲线如图5所示。这些实验数据表明,其转换效率通过使用新材料和工艺优化后,得到了明显的提高^[31]。

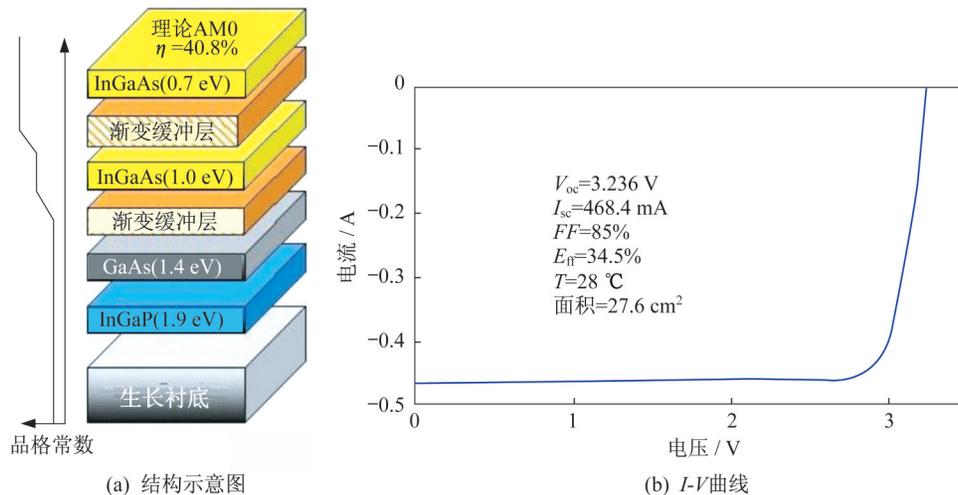


图5 InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As倒装四结太阳能电池示意图和I-V曲线^[29]

Fig.5 Schematic diagram of InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.58}Ga_{0.42}As IMM 4J solar cells and I-V curves^[29]

2016年,云南师范大学薛丹等^[32]设计了含有InGaAs材料的四结太阳能电池并对其进行仿真,并对太阳能电池结构进行重新设计,对各子电池进行电流匹配优化,并对发射区和基区厚度进行调整,最终获得了34.87%转换效率的倒置四结太阳能电池。2018年,北京空间飞行器总体设计部张晓鹏等^[33]报道了高效倒装四结太阳能电池的优化设计,通过对隧穿结的掺杂浓度、厚度以及材料方面进行设计优化,使得倒装四结太阳能电池的效率获得了明显提

升。目前,含有In_{0.58}Ga_{0.42}As材料的倒装四结太阳能电池尚处于理论实验研究阶段,对于双缓冲层的设计及电池的各项优化报道越来越多,同时各项理论数据较倒装三结空间太阳能电池也有显著提高。

4 InGaAs材料空间太阳能电池的抗辐照性能

除了高光电转换效率外,良好的抗辐照性能也是多结空间太阳能电池的重要要求之一^[34]。空间环

境中的带电粒子(质子、电子)能量范围大,当太阳能电池受到空间粒子辐照时,会产生两种作用:一种是电离作用;另一种是位移作用。粒子辐照在太阳能电池内部引入复合中心,导致少数载流子寿命缩短,其中,少子寿命 τ 与辐照注量 ϕ 关系式为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + k_c \phi \quad (2)$$

式中: τ 、 τ_0 分别为辐照前、后的少数载流子寿命; k_c 为寿命损伤系数。

少数载流子扩散长度 L 和少数载流子寿命关系式为

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (3)$$

式中: D 为相对损伤系数。

少数载流子扩散长度与辐照注量 ϕ 关系式为

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \phi \quad (4)$$

式中: L_0 和 L 分别为辐照前后少数载流子扩散长度; K_L 为损伤系数^[35]。

因此,太空中的辐射环境会导致多结空间太阳能电池性能的退化。目前评价一款空间太阳能电池的性能不仅要求其具有高转换效率,还要具备良好的抗辐照性能^[36]。下面主要介绍两种材料的抗辐照性能。

4.1 In_{0.3}Ga_{0.7}As 材料空间太阳能电池中的抗辐照性能

2016 年 Imaizumi 等^[37]对 InGaP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As(1.0 eV)倒装三结太阳能电池及其子结进行了 1 MeV 电子和 3 MeV 质子辐照实验。实验数据见表 3,其中 n_0 表示二极管系数, I_0 为暗电流。尽管 In_{0.3}Ga_{0.7}As 材料的带隙较低,但是该材料 V_{oc} 和 I_{sc} 的辐照退化结果与 InGaP 材料相当。实验通过对 In_{0.3}Ga_{0.7}As 子结电池辐照前、后结果分析得出该材料具有良好的抗辐照性能。

2018 年,哈尔滨工业大学刘秋月等^[38]报道了电子和质子综合辐照对 InGaAs 电池性能影响,并运用了模拟和实验相结合的方式对该材料分别进行了电子辐照、质子辐照以及电子、质子共同辐照实验,并对其辐照后性能做出了综合评价,得出 In-GaAs 材料在各种辐照条件下退化幅度均优于传统三结太阳能电池。近年来,对于 In_{0.3}Ga_{0.7}As 材料的倒装空间三结太阳能电池的辐照性能报道越来越多,这

表 3 质子和电子辐照对各子结电池性能影响^[37]

Tab.3 Effects of proton and electron irradiation on the performance of various subjunctioncells^[37]

子结电池	测试条件	1 MeV 电子辐照 3×10 ¹⁵ /cm ²		3 MeV 质子辐照 3×10 ¹² /cm ²	
		n	I_0	n	I_0
GaInP	初始值	2.0	5.0×10 ⁻¹⁵	2.1	2.0×10 ⁻¹⁴
	辐照后	2.0	3.0×10 ⁻¹⁴	2.1	5.0×10 ⁻¹³
GaAs	初始值	2.5	2.0×10 ⁻¹⁰	2.2	1.0×10 ⁻¹⁰
	辐照后	2.6	3.0×10 ⁻⁹	2.0	2.0×10 ⁻⁹
In _{0.2} Ga _{0.8} As	初始值	2.2	2.5×10 ⁻⁸	2.2	2.5×10 ⁻⁸
	辐照后	2.1	1.8×10 ⁻⁷	2.1	6.0×10 ⁻⁷
In _{0.3} Ga _{0.7} As	初始值	1.8	6.0×10 ⁻⁸	2.1	3.0×10 ⁻⁷
	辐照后	1.9	6.5×10 ⁻⁷	2.0	2.5×10 ⁻⁶

些实验结果为未来该种电池进入空间领域打下了坚实的基础。

4.2 In_{0.58}Ga_{0.42}As 材料空间太阳能电池中的抗辐照性能

2012 年, Aiken 等^[29]在倒装三结空间太阳能电池的基础上,在 In_{0.3}Ga_{0.7}As(1.0 eV)子电池下插入 In_{0.58}Ga_{0.42}As(0.7 eV)底电池,并进行了 1 MeV 的电子辐照实验,其电池的辐照前、后量子效率(EQE)如图 6 所示。结果表明,该倒装四结空间太阳能电池在寿命初期(BOL)时的效率为 34%,并且在寿命末期(EOL)时的剩余系数高于 82%。

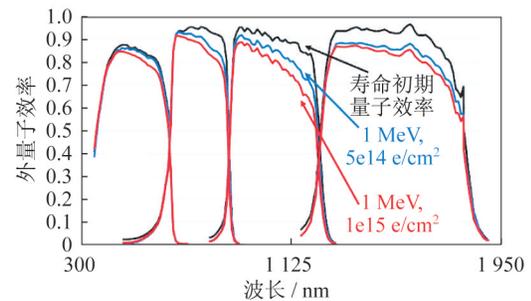


图 6 倒装四结空间太阳能电池辐照前后各子结的 EQE^[29]

Fig.6 EQEs of the subjunctions of IMM 4J solar cell before and after irradiation^[29]

2014 年,美国 Spectrolab 报道了倒装四结空间太阳能电池在空间环境下的测试。结果表明,IMM4J 空间太阳能电池在 1 MeV 电子辐照环境及干燥氮气环境经过 250 °C 热浸 1 600 h 后,其效率退化结果优于传统三结空间太阳能电池^[39]。2017 年,云南师范大学赖旺富等^[40]报道了倒置四结太阳能电池的电子辐

照性能研究及其仿真分析,利用 Apsys 模拟软件对四结太阳能电池进行仿真并制备样品进行电子辐照实验。实验结果表明,经过电流匹配设计的四结太阳能电池具有良好的转换效率及抗辐照性能,并找出电流限制结进行相关理论分析,为该种电池在未来的空间应用打下坚实的基础。2017年,哈尔滨工业大学张延清等^[41]报道了对倒装三结和四结空间太阳能电池及其关键子电池结构的 1 MeV 电子辐照试验,以及 In_xGa_{1-x}As 子电池与倒装四结空间太阳能电池辐照后的低温退火效应,揭示了该电池的电能恢复规律及其缺陷稳定性。实验结果表明,该电池与倒装三结太阳能电池相比,其光电转换效率提升明显,但抗辐照性能需要进行进一步的优化。

5 结束语

本文详细地介绍了 InGaAs 材料近年来在多结空间太阳能电池的应用发展及其抗辐照性能,通过与传统 GaInP/GaAs/Ge 结构的三结太阳能电池对比发现,含有 InGaAs 材料的多结空间太阳能电池无论是在理论转换效率,还是在抗辐照性能上都具有更加优异的表现。由于 InGaAs 材料带隙可调,响应波段范围广,在未来更多结太阳能电池研究领域,该材料是优秀的候选者之一,所以对 InGaAs 材料在多结空间太阳能电池领域的深入研究就变得为重要。

但由于该种太阳能电池采用了晶格失配材料,需要在电池结构中增加渐变缓冲层,并且运用了键合、剥离等新工艺,使得其生长成本增加,同时在生长过程中会产生一定缺陷,最终导致其实际效率与理论效率还有一部分差距。因此,随着对 InGaAs 材料的研究不断深入,该材料在未来多结太阳能电池的研究方向主要是通优化电池结构、探索更优生长条件并设计更可靠的缓冲层来获得含有高质量 InGaAs 材料的多结空间太阳能电池,从而进一步提升多结太阳能电池的转换效率和抗辐照性能,最终实现提升卫星整体有效载荷和服役时间的目的。

参考文献

- [1] BAUR C, BETT AW, DIMROTH F, et al. Triple-junction III-V based concentrator solar cells: perspectives and challenges [J]. *Journal of Solar Energy Engineering: Transactions of the ASME*, 2007, 129: 258-265.
- [2] 张忠卫,陆剑峰,池卫英,等.砷化镓太阳能电池技术的进展与前景[J].*上海航天*, 2003, 20(3): 33-38.
- [3] GREEN M A, DUNLOP E D, LEVI D H, et al. Solar cell efficiency tables (Version 55) [J]. *Progress in Photovoltaics*, 2020, 28: 3-15.
- [4] GUTER W, SCHOENE J, PHILIPPS S P, et al. Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 223504.
- [5] CANOVAS E, MARRON D F, MARTI A, et al. Photorefectance analysis of a GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cell [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97: 203504.
- [6] ARAKI K, OTA Y, SAIKI H, et al. Super-multi-junction solar cells-device configuration with the potential for more than 50% annual energy conversion efficiency (non-concentration) [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2019, 9: 4598.
- [7] WILT D, STAN M. High efficiency multijunction photovoltaic development [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51: 11931-11940.
- [8] 刘雨生,刘雯,张淑媛,等.陷光结构在 GaAs 薄膜太阳能电池中的应用[J].*材料导报*, 2017, 31(11): 11-19.
- [9] 付蕊,陈诺夫,涂洁磊,等.基于 III-V 族材料制备的高效多结太阳能电池最新技术进展[J].*材料导报*, 2015, 29(7): 124-128.
- [10] CICIC S, TOMIC S. Automated design of multi junction solar cells by genetic approach: reaching the > 50% efficiency target [C]// 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. 2018: 1782-1787.
- [11] POROD W, FERRY D K. Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds [J]. *Physical Review B*, 1983, 27: 2587-2589.
- [12] 李晋平.大失配 InGaAs 异质结的 MOCVD 生长与材料特性研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [13] 史衍丽,胡锐,张卫锋,等. InGaAs 固体微光器件研究进展[J].*红外技术*, 2014, 36: 81-88.
- [14] 张玮,伍萌佳,陈鸣波.键合集成 AlGaInP/GaAs/InGaAsP/InGaAs 太阳能电池组分与厚度对效率的影响 [J].*电源技术*, 2010, 34: 924-927.
- [15] 张永,蔡建九,王向武,等.空间用 GaInP/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.7}As(1 eV)倒装三结太阳能电池研制[J].*物理学报*, 2013, 62: 571-575.
- [16] ORDERS P J, USHER B F. Determination of critical layer thickness in In_xGa_{1-x}As/GaAs heterostructures by X-ray diffraction [J]. *Applied Physics Letters*, 1987,

- 50:980.
- [17] 刘如彬,王帅,孙强,等.晶格失配 GaAs 太阳电池的渐变缓冲层生长技术研究[C]//第十一届全国 MOCVD 学术会议.2010:1-5.
- [18] KANIEWSKI J, MUSZALSKI J. Recent advances in InGaAs detector technology[J]. *Physica Status Solidi*, 2004,201:2281-2287.
- [19] TAKAMOTO T, AGUI T. High-efficiency InGaP/In_{0.01}Ga_{0.99}As tandem solar cells lattice-matched to Ge substrates[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 66:511-516.
- [20] KING R R, FETZER C M, EDMONDSON K M, et al. Metamorphic III-V materials, disordersublattice, and multijunction solar cell approaches with over 37% efficiency [C]// 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2004:3587-3593.
- [21] AMANO H, SAWAKI N, AKASAKI I. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48:035335500.
- [22] 张启明,张恒,孙强,等.用于多结叠层太阳电池的 GaInAsN 材料研究进展[J]. *电源技术*, 2015, 39: 232-237.
- [23] 高芳亮,大失配缓冲层技术外延生长 In_{0.3}Ga_{0.7}As 薄膜及其电池制备[D].广州:华南理工大学,2016.
- [24] YAMAGUCHI M, IKEDA K, TAKAMOTO T, et al. Fundamentals and recent results of super high efficiency solar cells[C]// SPIE Defense Conference. 2014:908312.
- [25] BOISVERT J, LAW D, KING R, et al. Development of advanced space solar cells at Spectrolab[C]// 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 2010:11625621.
- [26] TAKAMOTO T, AGUI T, YOSHIDA A, et al. World's highest efficiency triple-junction solar cells fabricated by inverted layers transfer process[C]// 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2010: 11625953.
- [27] TAKAMOTO T, WASHIO H, JUSO H. Application of InGaP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells to space use and concentrator photovoltaic [C]// 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference. 2014: 14683619.
- [28] 张梦炎,郭振,孙利杰,等.大面积、高性能柔性 GaInP/GaAs/InGaAs 叠层太阳电池的制备[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37: 518-522.
- [29] PATEL P, AIKEN D, BOCA A, et al. Experimental results from performance improvement and radiation hardening of inverted metamorphic multijunction solar cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2011, 2: 1217-1221.
- [30] STAN M, AIKEN D, CHO B, et al. High-efficiency quadruple junction solar cells using OMVPE with inverted metamorphic device structures [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2010, 312:1370-1374.
- [31] CORNFELD A B, AIKEN D, CHO B, et al. Development of a four sub-cell inverted metamorphic multi-junction (IMM) highly efficient AM0 solar cell [C]// 35th IEEE PVSC. 2010: 11626016.
- [32] 薛丹.带隙匹配型四结 GaAs 太阳电池的结构设计与性能模拟[D].昆明:云南师范大学,2016.
- [33] 张晓鹏,庄海孝,曹燕,等.高效四结砷化镓太阳电池设计与在轨性能分析[J]. *航天器环境工程*, 2018, 35: 535-540.
- [34] AIERKEN A, FANG L, HEINI M. Effects of proton irradiation on upright metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple junction solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 185:36-44.
- [35] HU J M, WU Y Y, XIAO J D, et al. Degradation behaviors of electrical properties of GaInP/GaAs/Ge solar cells under [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92:1652-1656.
- [36] GUO H L, SHI L F, 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, 191:399-405.
- [37] IMAIZUMI M, NAKAMURA T, TAKAMOTO T, et al. Radiation degradation characteristics of component subcells in inverted metamorphic triple-junction solar cells irradiated with electrons and protons [J]. *Progress in Photovoltaics*, 2017, 25:161-174.
- [38] 刘秋月.电子和质子综合辐照对不同结构 InGaAs 电池性能影响[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [39] REHDER E, JUN B, CHIU P. Environmental testing of inverted metamorphic solar cells for space [C]// IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference. 2014: 14683944.
- [40] 赖旺富.倒置四结砷化镓太阳电池的电子辐照性能研究及其仿真分析[D].昆明:云南师范大学,2017.
- [41] ZHANG Y Q, HO M X, WU Y Y. Degradation behavior of electrical properties of GaInAs (1.0 eV) and GaInAs (0.7 eV) sub-cells of IMM4J solar cells under 1 MeV electron irradiation [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26:801-807.