宽禁带半导体材料与器件专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022053007

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应及加固技术研究进展

王祖军[1,2*]，王兴鸿[3]，晏石兴[2]，唐　宁[2]，崔新宇[4]，
张　琦[4]，石梦奇[5]，黄　港[2]，聂　栩[2]，赖善坤[2]

（1. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室，西安 710024；
2. 湘潭大学 材料科学与工程学院，湖南 湘潭 411105；3. 西安高科技研究所，西安 710025；
4. 中国电子科技集团公司第十八研究所，天津 300384；5. 上海空间电源研究所，上海 200245）

摘　要： 文章首先重点介绍了国内外开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子、质子及其他辐射粒子或射线辐照实验的研究进展，然后从辐照损伤效应的仿真模拟研究、抗辐射加固技术、损伤预估方法等方面综述了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应及加固技术的研究进展，最后梳理了当前 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应研究中亟待解决的关键技术问题，为深入开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应实验方法标准制定、损伤机理分析、在轨寿命预估及抗辐射加固技术研究提供了理论指导和实验技术支持。

关键词： GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池；辐照损伤；位移效应；抗辐射加固；电子辐照；质子辐照

中图分类号： TM914.4　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0490－15

Progress of Radiation Effects on GaInP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells

WANG Zujun[1,2], WANG Xinghong[3], YAN Shixing[2], TANG Ning[2], CUI Xinyu[4],
ZHANG Qi[4], SHI Mengqi[5], HUANG Gang[2], NIE Xu[2], LAI Shankun[2]

(1. State Key Lab. of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, CHN; 2. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, CHN; 3. Xi'an Research Institute of High-Technology, Xi'an 710025, CHN; 4. The 18th Institute of CETC, Tianjin 300384, CHN; 5. Shanghai Institude of Space Power-Sources, Shanghai 200245, CHN)

Abstract: With the wide applications of GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells used in spacecraft as a space power supply system, the problem of space radiation damage is widely concerned. The performance of GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells will be degraded by the irradiation of the electrons, protons and other radiation particles or rays in the space radiation environment. In this paper, the research progress of the radiation experiments of GaInP/GaAs/Ge triplet solar cells induced by the electrons, protons and other radiation particles or rays at home and abroad is introduced in depth, and then the research progress of the simulation of radiation damage effect, radiation hardening, and radiation damage prediction of GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells is reviewed. The key problems in the research of radiation damage effect on GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells are summarized. It provides theoretical guidance and experimental technical support for the establishment of the experimental method of

收稿日期：2022－05－30.
基金项目：国家自然科学基金项目(U2167208，11875223)；国家重点实验室基金项目(SKLIPR1803，SKLIPR2012，SKLIPR2113).
*通信作者：王祖军　**E-mail：**wzj029@qq.com

radiation damage effect, the analysis of damage mechanism, the prediction of in-orbit life and the research of radiation hardening technology of GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells.

Key words: GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells; radiation damage; displacement effect; radiation hardening; electron radiation; proton radiation

0 引言

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池是由 GaInP 顶电池、GaAs 中电池、Ge 底电池及两个隧穿结共同组成的多结太阳电池，与传统的 Si 和 GaAs 单结太阳电池相比，其具有结构稳定、可靠性高、寿命长、小型轻质、光电转化效率高、光吸收系数高等优点，目前已成为空间电源系统的核心元器件，被广泛应用于航天器的电力系统。然而，当 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池长期在轨运行时，将会遭受空间辐射损伤的影响，空间环境中的电子、质子辐照损伤会导致 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的性能参数衰降，严重时甚至导致航天器供电系统功能失效。因此，GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照损伤效应问题备受关注。

国外开展太阳电池辐照损伤效应研究较早。1958 年，美国首先在“先锋者 1 号”卫星上使用 Si 太阳电池作为航天器空间电源后不久就开始了太阳电池的辐照损伤效应研究[1]。早期的太阳电池辐照损伤效应研究主要针对传统的 Si，GaAs，InP 等单结太阳电池，经过数十年的持续研究，对单结太阳电池辐照损伤效应实验、损伤机理、损伤评估技术等研究较系统完善，而对高效多结太阳电池的辐照损伤效应研究相对较少。

高效多结太阳电池采用多结叠层技术，对太阳光谱的主要波谱比单结太阳电池具有更好的光谱吸收，因而可获得更高的转换效率。尽管国内外已报道的四结、五结、六结等多结太阳电池比三结太阳电池有更好的太阳光谱吸收，获得了更好的电流匹配和更高的转换效率，然而从工艺成熟度、性价比、可靠性、抗辐射能力等诸多因素综合考量，目前技术相对更成熟、航天应用最广泛的仍然是 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池。2002 年以后，国内外航天器空间电源系统的核心元器件主要采用 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池[2-4]。因此，本文主要聚焦 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照损伤效应及加固技术研究进展。

近 20 多年以来，国内外的多个研究团队均开展了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应实验和仿真模拟研究，鉴于三结太阳电池的组成结构和辐照损伤机理比单结太阳电池更复杂，其在辐照损伤效应机理分析、抗辐射加固设计、在轨辐照损伤预估等研究中仍存在诸多亟待解决的问题。开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池不同能量粒子辐照损伤等效及不同类型辐射粒子（如电子与质子）辐照损伤等效研究，仍缺乏较系统的辐照实验数据支撑。目前国内外开展的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应研究主要以辐照损伤效应实验和规律分析为主，尚未形成辐照实验、仿真模拟、损伤机理、在轨辐照损伤预估和加固设计的体系研究。

本文以 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池为研究对象，首先，系统分析了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池电子、质子及其他辐射粒子或射线辐照损伤效应的实验研究进展；然后，从辐照损伤效应的仿真模拟研究、抗辐射加固技术、损伤预估方法等方面综述了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应及加固技术研究进展；最后，梳理了当前 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应研究中亟待解决的关键技术问题。本文的研究将为深入开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应实验方法标准制定、损伤机理分析、在轨寿命预估及抗辐射加固技术研究提供理论指导和实验技术支持。

1 辐照损伤效应实验研究进展

2002 年以来，国内外的多个研究团队开展了大量的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应实验研究。通过开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池电子[5-17]、质子[5,15,18-25]、α 粒子[27]、重离子[15]、γ 射线[28]、中子[28]等辐照实验研究，得到了辐射粒子或射线辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐射敏感参数衰降的实验规律，为了解和掌握 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池对辐照损伤敏感度和抗辐射能力评估提供了实验数据支撑。

在空间辐射环境中，太阳电池的辐照损伤主要由电子和质子引起，国内外已开展的太阳电池辐照损伤效应实验也主要以电子、质子辐照实验为主，因

此，本文首先重点介绍国内外在 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池电子、质子辐照损伤效应实验上的研究进展。鉴于已开展的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池其他辐射粒子或射线的辐照实验研究相对较少，本文仅简要介绍了 GaInP/InGaAs/Ge 三结太阳电池 α 粒子、重离子、中子、γ 射线辐照损伤效应实验研究进展情况。

1.1 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池电子辐照实验研究进展

国内外对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照损伤效应实验研究开展得较多。大多数电子辐照实验的能量为 1 MeV，只有少量的电子辐照实验能量在 keV 量级及 1 MeV 以上。辐照注量率范围主要为 $1\times10^{10}\sim4\times10^{12}$ e·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量范围主要为 $1\times10^{12}\sim1\times10^{17}$ e·cm^{-2}。电子辐照实验前后主要监测了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的开路电压(V_{oc})、短路电流(I_{sc})和最大输出功率(P_m)等辐射敏感参数的衰降程度。

2002 年，Sharps 等研究了 EMCOER 公司研制的一款商用 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照损伤效应[5]。电子能量分别为 1，2，12 MeV，辐照注量范围为 $5\times10^{12}\sim5\times10^{15}$ e·cm^{-2}。实验测试结果表明：该三结太阳电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 等辐射敏感参数衰降程度均随电子辐照注量增大而增大，且在相同的辐照注量下，能量越高，电子辐照诱发的衰降程度越大；在 1 MeV 电子辐照注量分别为 5×10^{14} 和 1×10^{15} e·cm^{-2} 时，P_m 分别衰降了 9% 和 13%。文章基于辐照实验数据，分析了不同能量电子辐照该三结太阳电池诱发 V_{oc}，I_{sc}，P_m 衰降的等效损伤因子(RDC)。

2005 年，Baur 等应用光谱表征方法研究了 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳电池和晶格匹配(LM) AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge 五结太阳电池的电子辐照特性[6]。电子能量为 1 MeV，辐照注量为 1×10^{15} e·cm^{-2}。在 AM0 条件下的实验测试结果表明：相比于该三结电池的 GaInP 顶电池和 Ge 底电池，GaInAs 中电池抗辐射能力很弱，当电子辐照为 1×10^{15} e·cm^{-2} 时，中电池和顶电池的外量子效率(EQE)分别衰降 22% 和 3%；由晶格匹配制成的 AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge 五结电池与三结电池的转化效率接近，但抗辐射能力更强。同年，Sugimoto 等也用该方法研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照效应[7]。电子能量为 1 MeV，辐照注量为 $5\times10^{13}\sim3\times10^{15}$ e·cm^{-2}。在室温下进行的光谱测试表明：三个子电池的光谱响应衰降程度均随着电子辐照注量增大而增大，且在相同的辐照注量下，GaAs 中电池光谱响应衰降最为严重，GaInP 顶电池和 Ge 底电池的光谱强度几乎没有降低。

2007 年，牛振红等研究了一种采用金属有机物化学沉淀(MOCVD)方法制备的国产 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照特性[8]。电子能量为 1 MeV，辐照注量率为 5×10^{10} e·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量分别为 5×10^{13}，1×10^{14}，2×10^{14}，5×10^{14}，1×10^{15} 和 2×10^{15} e·cm^{-2}。实验测试结果表明：该三结太阳电池的辐射敏感参数衰降程度随电子辐照注量增大而增大，在辐照注量为 1×10^{15} e·cm^{-2} 时，V_{oc}，I_{sc}，P_m 衰降分别为 9.80%，7.60%，19.60%；在辐照注量为 2×10^{15} e·cm^{-2} 时，V_{oc}，I_{sc}，P_m 衰降分别为 11.32%，13.65%，27.59%。文章分析认为：电子辐照诱发 GaAs 中电池的 I_{sc} 严重衰降，而 GaInP 顶电池的 I_{sc} 没有明显的退化，导致 GaInP 顶电池与 GaAs 中电池的电流失配是造成该三结太阳电池性能退化的主要原因。

2009 年，胡建民等研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照损伤效应[9]。电子能量分别为 1 和 1.8 MeV，辐照注量率为 1×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量分别为 1×10^{14}，3×10^{14}，5×10^{14}，1×10^{15}，3×10^{15} e·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃ 条件下的实验测试结果表明：该三结太阳电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 等辐射敏感参数衰降程度均随电子辐照注量增大而增大，且在相同的辐照注量下，1.8 MeV 电子辐照诱发的衰降程度大于 1 MeV 电子辐照；在 1 MeV 电子辐照注量为 1×10^{15} e·cm^{-2} 时，P_m 衰降了 17.7%。文章基于暗场 *I-V* 特性分析认为：电子辐照诱发三结太阳电池的串联、并联电阻的变化是导致其电学性能衰降的主要因素；基于光谱响应分析认为电子辐照诱发三结太阳电池的 GaAs 子电池基区底部光生载流子收集效率衰降是导致其光学性能衰降的主要因素。

2011 年，Imaizumi 等研究了单结 GaInP 电池和 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池低能电子辐照损伤效应[10]。InGaP 单结电池辐照实验中，电子能量分别为 200，400 keV，辐照注量分别为 3×10^{15}，1×10^{16} e·cm^{-2}，GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照实验中，电子能量为 150，200，300 和 500 keV，辐照注量在 $10^{14}\sim10^{17}$ e·cm^{-2} 范围内。实验测试结果表明：

当电子能量小于 In 原子和 Ga 原子反冲能(300 keV)时，辐照后两种电池的 I_{sc} 均未有明显衰降，而 V_{oc} 会显著降低，但衰降幅度与电子能量不相关。分析实验现象认为：由 P 原子反冲引起的辐照诱导缺陷不足以降低 GaInP 电池中的少数载流子寿命，电池的 I_{sc} 不会有明显衰降，V_{oc} 的衰降并不是由于反向饱和电流的增加，而是由于小于 300 keV 的电子辐照增加了材料表面复合率。

2015 年，齐佳红等研究了电子辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池短路电流退化的物理机制[11]。电子能量为 1 MeV，辐照注量率为 1×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量最高累积到 3×10^{15} e·cm^{-2}。实验测试结果表明：该三结太阳电池的 GaAs 中电池的光谱响应在 700～900 nm 波段出现明显衰降；GaAs 中电池的少数载流子扩散长度随电子辐照注量增大而减小。文章结合 PC1D 程序模拟结果和辐照实验结果分析认为：电子辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池短路电流退化的物理机制主要归因于电子辐照诱发 GaAs 中电池的少数载流子扩散长度减小。

2017 年，Tex 等研究了反向生长 GaInP/GaAs/InGaAs 三结太阳电池的电子辐照损伤特性[12]。电子能量为 1 MeV，辐照注量分别为 3×10^{13}，1×10^{14}，3×10^{14}，1×10^{15} 和 3×10^{15} e·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下电池的 I-V 测试结果表明：三结电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 衰降程度均随着电子辐照注量的增大而增大，与 I_{sc} 相比，V_{oc} 在较低的辐照注量下就出现严重衰降，P_m 则在低辐照注量下衰降很小，在高辐照注量下衰降很大。文章基于载流子动力学分析认为：虽然顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 在电子辐照后都受到了严重的损伤，但由于顶电池有较高的内部电场，辐照诱发缺陷对其性能影响不大，因此整个器件的参数衰降主要归因于 GaAs 中电池的辐照损伤。

2017 年，李占行等研究了采用 MOCVD 方法制备的晶格匹配(LM)和晶格失配(UMM)GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池电子辐照损伤效应[13]。电子能量为 1 MeV，辐照注量率为 1×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量分别为 5×10^{14}，1×10^{15} 和 1.5×10^{15} e·cm^{-2}。在 AM0 和室温条件下实验测试结果表明：两种电池的 I-V 特性参数在电子辐照后均发生衰降，UMM 电池的衰降程度大于 LM 电池，在辐照注量为 1.5×10^{15} e·cm^{-2} 时，LM 电池的 V_{oc} 和 I_{sc} 分别衰降 10.49% 和 6.61%，UMM 电池的 V_{oc} 和 I_{sc} 分别衰降 11.42% 和 9.60%；LM 电池的顶电池光谱响应衰降程度大于 UMM 电池的顶电池，而 LM 电池的中电池光谱响应衰降程度小于 UMM 电池的中电池。文章分析认为：I-V 特性参数和光谱响应衰降的主要原因是电子辐照诱发大量感生缺陷。

2019 年以来，王祖军等较系统地研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在不同能量、不同辐照注量率、不同入射角度等条件下的电子辐照损伤效应[14]。电子能量分别为 1，3，5 和 10 MeV，辐照注量率范围为 $1\times10^{10}\sim4\times10^{12}$ e·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量分别为 1×10^{13}，1×10^{14}，1×10^{15}，1×10^{16} 和 5×10^{16} e·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下的实验测试结果表明：该三结太阳电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m，EQE 等辐射敏感参数衰降程度均随电子辐照注量增大而增大，如图 1 所示；在相同的辐照注量下，电子能量越高，衰降程度越大，如图 2 所示；在相同的辐照注量下，电子辐照注量率没有明显影响；不同入射角度电子辐照诱发的衰降程度有明显差别；电子辐照后退火 3 个月，辐射敏感参数几乎没有发生变化。图 1 给出了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在 1 MeV 电子辐照前后的 I-V 特性。图 2 给出了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的 V_{oc} 在 1 MeV 和 10 MeV 电子辐照后的衰降曲线。

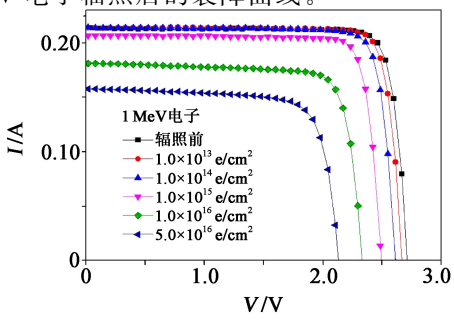


图 1　不同辐照注量下，GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在 1 MeV 电子辐照前后的 I-V 特性[14]

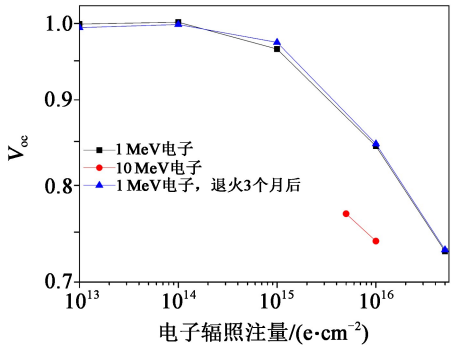


图 2　相同辐照注量下，GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的 V_{oc} 在 1 和 10 MeV 电子辐照后的衰降曲线[14]

2020年,颜平远等研究了基于布拉格反射器(DBR)结构的UMM GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的电子辐照损伤效应[15]。电子能量为1 MeV,辐照注量率为1×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1},辐照注量分别为1×10^{15},2×10^{15}和5×10^{15} e·cm^{-2}。在AM0和室温条件下实验测试结果表明:该三结电池各项电学参数的衰降程度随电子辐照注量增大而增大;I_{sc}的退化率大于V_{oc}的退化率,Ge底电池的I_{sc}的退化率大于其他子电池,GaInP顶电池的电流始终等于UMM GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的整体电流;随着电子辐照注量增大,DBR结构区域的中心波长位置未发生明显变化,最高反射率虽然出现了衰降,但仍能起到高反射作用。

2021年,Park等研究了在不同温度下电子辐照造成GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池及其子电池参数退化的物理机制[16]。电子能量为1 MeV,辐照注量率分别为2.5×10^{11}和5×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1},辐照注量分别为7.5×10^{14},1.5×10^{15}和3×10^{15} e·cm^{-2},温度分别为100,123,150,200,250,300 K。在AM0的条件下实验测试结果表明:不同温度下该三结太阳电池的参数衰降程度有明显差异,与在300 K条件下相比,在123 K条件下电池的V_{oc},P_m衰降程度更小,填充因子(F_F)衰降程度更大;将123 K下受辐照的三结电池温度提高至300 K后,与300 K下受辐照的电池参数衰减特性相似。分析实验结果认为:电子辐照在各子电池结区都产生了缺陷,造成隧穿效应,引入了过量的电流,造成电池参数衰降[5]。

2021年,李娟等研究了LM和倒置晶格失配(IMM)GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的电子辐照损伤效应[17]。电子能量为1 MeV,辐照注量率为1×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1},辐照注量分别为1×10^{14},5×10^{14},1×10^{15}和5×10^{15} e·cm^{-2}。实验测试结果表明:IMM和LM电池的电学性能衰降程度均随辐照注量的增大而增大;在辐照注量为1.5×10^{15} e·cm^{-2}时,IMM和LM电池电学性能衰降程度排序依次为P_m,V_{oc},F_F,I_{sc};IMM电池的P_m衰降程度比LM电池小,LM电池的V_{oc}和F_F衰降程度比IMM电池小。

通过分析近20多年以来国内外已开展的GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池电子辐照损伤效应实验研究进展情况,得到了电子辐照损伤诱发GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池主要辐射敏感参数衰降的实验规律和损伤机理;在一定能量范围内,不同能量电子辐照损伤规律符合电子能量随电子非电离能量损失(NIEL)变化的关系曲线,即在相同的辐照注量下,电子能量越高,GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池主要辐射敏感参数衰降程度越大。此外,王祖军研究团队结合当前国内电子辐照模拟实验装置现有条件,在可提供的能开展太阳电池稳态累积剂量辐照实验的最大辐照注量率范围内(电子辐照注量率范围跨越4个数量级),开展了大量的电子辐照实验,初步辐照实验结果表明:在该辐照注量率范围内(不含强脉冲辐射环境下的瞬时极高注量率),不同电子辐照注量率对GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池主要辐射敏感参数衰降程度的影响差别很小。

1.2 GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的质子辐照实验研究进展

国内外对GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的质子辐照损伤效应实验研究开展得也较多。与电子的辐照损伤相比,质子对三结电池的辐照损伤效应较为复杂,低能质子(小于1 MeV)穿透能力相对较弱。质子能量不同会导致其在三结太阳电池的不同区域,造成不均匀损伤,如高能质子(大于1 MeV)能完全穿透三结太阳电池的活性区,造成均匀损伤。因此,在研究三结太阳电池的子电池抗质子辐照能力时,需要考虑开展辐照实验时的质子能量的影响。本文中介绍的质子辐照实验能量主要在keV量级及1~10 MeV范围内。辐照注量率范围主要为1×10^{7}~1×10^{10} p·cm^{-2}·s^{-1},辐照注量范围主要为5×10^{8}~1×10^{14} p·cm^{-2}。质子辐照后,重点关注了GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的V_{oc},I_{sc},P_m等辐射敏感参数的衰降程度。此外,GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的中电池GaAs的抗质子辐照能力较弱,是影响三结太阳电池性能的主要因素,因此本文对相关研究也进行了重点关注。

2002年,Sharps等研究了EMCOER公司研制的一款商用GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的质子辐照损伤效应[5]。质子能量分别为50,100,200,400 keV和1,2,10 MeV,辐照注量范围为5×10^{8}~5×10^{12} p·cm^{-2}。实验测试结果表明:该三结太阳电池的V_{oc},I_{sc},P_m等辐射敏感参数衰降程度均随质子辐照注量增大而增大;V_{oc},I_{sc},P_m的RDC在质子能量为200 keV时最大,当质子能量大于200 keV时,能量越高,RDC越小。

2003年,Sumita等研究了GaInP/GaAs/Ge三

结太阳电池在不同能量质子辐照下的损伤特性[18]。质子能量分别为 0.03，0.10，0.25，2，10 MeV，辐照注量在 $1\times10^{10}\sim1\times10^{14}$ p·cm^{-2}。在 AM0 条件下实验测试结果表明：质子能量相同时，该三结太阳电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 的衰降程度均随着质子辐照注量的增大而增大；质子注量相同时，0.25 MeV 质子造成该三结太阳电池辐射敏感参数衰降程度最大。文章结合光谱响应和 TRIM 程序模拟结果分析认为：该三结太阳电池的质子辐照损伤效应与质子能量、电池结构密切相关，0.25 MeV 质子的能量沉积主要在 GaAs 中电池区域，造成的辐照损伤最严重，表明 GaAs 中电池是三个子电池中抗辐射能力最弱的。

2006 年，Yamaguchi 等研究了基区掺杂浓度对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的 GaInP 顶电池和 GaAs 中电池质子辐照特性的影响[19]。对不同基区掺杂浓度的顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 分别进行了辐照实验，质子能量分别为 30 和 200 keV，辐照注量为 1×10^{10}，1×10^{11} 和 1×10^{12} p·cm^{-2}。实验测量结果表明：当基区掺杂浓度较高时，顶电池 GaInP 的 I_{sc} 随着质子辐照注量的增大衰降的速度较快，而 V_{oc}，P_m 的衰降幅度几乎没有受基区掺杂浓度影响；GaAs 中电池的 V_{oc}，I_{sc} 的衰降幅度在不同基区掺杂浓度下比较接近，P_m 则在基区掺杂浓度最大时衰减最快。文章基于模拟光谱响应分析认为：质子辐照诱导缺陷减少了 GaAs 中电池基区载流子浓度，使电池串联电阻增加，所以对串联电阻不敏感的 V_{oc}，I_{sc} 变化不大，但电池的填充因子会降低，导致 P_m 快速衰降。

2007 年，王荣等研究了 MOCVD 法制备的国产 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的质子辐照损伤效应[20]。质子能量分别为 0.28，0.62，2.80 MeV，辐照注量率为 5×10^{8} p·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量分别为 1×10^{10}，1×10^{11}，1×10^{12}，1×10^{13} p·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下实验测试结果表明：在相同能量的质子辐照下，该三结电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 的衰降程度均随辐照注量增大而增大；在相同注量的质子辐照下，0.28 MeV 质子引起电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 的衰降幅度均最大，2.80 MeV 质子引起电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 的衰降幅度均最小，0.62 MeV 质子造成的性能衰降则在两者之间，并且随着质子注量的增加 I_{sc} 的衰降幅度要高于 V_{oc}。GaAs 中电池的光谱响应衰降程度在三个子电池中是最严重的。文章分析实验结果认为：质子辐照三结太阳电池产生的损伤主要由 I_{sc} 主导，辐照损伤主要发生在电池基区。

2008 年，胡建民等实验研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的低能质子辐照损伤效应[21]。质子能量为 40，100，170 keV，辐照注量率为 1.2×10^{10} p·cm^{-2}·s^{-1}。在 AM0 和 298 K 条件下的测试结果表明：当辐照注量低于 3.0×10^{11} p·cm^{-2} 时，100 keV 质子造成三结电池的 I_{sc} 衰降程度最大，40 keV 质子造成的衰降程度中等，170 keV 质子造成的衰降程度最小；当辐照注量高于 3.0×10^{11} p·cm^{-2} 时，170 keV 质子造成电池的 I_{sc} 衰降程度最大，而 100 keV 质子造成的衰降程度最小。文章基于 SRIM 程序计算结果认为：质子能量对电池性能衰降程度的影响取决于入射质子在电池中的能量沉积，当质子能量低于 100 keV 时，辐照损伤主要产生在顶电池，当质子能量高于 100 keV 时，辐照损伤主要产生在中电池，170 keV 质子辐照最为严重，可作为评估 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐照能力的参考能量。

2013 年，Maximenko 等研究了 GaInP/InGaAs/Ge 三结太阳电池在高注量质子辐照下的损伤效应[22]。质子能量为 3 MeV，辐照注量分别为 1×10^{11}，6×10^{11}，3.5×10^{12}，1.0×10^{13}，3.5×10^{13}，1.0×10^{14}，3.5×10^{14}，1.0×10^{15} p·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下进行的电池 I-V 测试结果表明：该三结电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 衰降幅度均随着辐照注量增大而增大，但在最高质子注量下，I_{sc} 的衰降占主导地位。文章通过分析电子扫描显微镜图像认为：质子辐照在顶电池和中电池的基区及空间电荷区产生了充当载流子复合中心的缺陷簇，导致载流子扩散长度减小，严重影响电池性能。

2018 年，Park 等研究了低温低照度下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的质子辐照损伤效应[23]。质子能量为 1 MeV，辐照注量率为 4×10^{9} p·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量在 $2\times10^{10}\sim1.6\times10^{12}$ p·cm^{-2}，温度分别为 100，123，200，300 K。在 AM0 条件下实验测试结果表明：在 300 K 的室温下，顶电池 GaInP 的 I_{sc} 较小，是影响三结电池总电流的限流电池，但辐照注量达到 10^{11} p·cm^{-2} 后，GaAs 中电池的 I_{sc} 衰降更大，成为新的限流电池；温度不同，电池的衰降特性也不同，当温度降低时，GaInP 顶电池的 I_{sc} 降低，而 GaAs 中电池的 I_{sc} 明显升高；Ge 底电池的 I_{sc} 衰降与温度密切相关，在 100 和 123 K 的低温下

衰降严重,成为影响电池总输出电流的限流电池。

2019 年,颜媛媛等研究了质子辐照后空间用 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的性能衰降和损伤机理,并单独对 GaAs 子电池进行了低能质子辐照实验[15]。三结电池辐照实验中,质子能量为 10 MeV,辐照注量率为 1×10^{9} p·cm^{-2}·s^{-1},辐照注量为 1×10^{10},3×10^{10},1×10^{11},3×10^{12},5×10^{13} p·cm^{-2},单结 GaAs 电池辐照实验中,质子能量为 150 keV,辐照注量率为 1×10^{9} p·cm^{-2}·s^{-1},辐照注量为 3×10^{10},1×10^{11},5×10^{11} p·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下实验测试结果表明:三结电池的 V_{oc},I_{sc} 的衰降幅度均随着质子辐照注量的增大而增大,当辐照注量大于 1×10^{11} p·cm^{-2} 时,电池参数都发生了明显的退化,并且衰降速度 V_{oc} 大于 I_{sc};单结 GaAs 子电池的 V_{oc},I_{sc} 的衰降幅度均随着质子辐照注量的增大而近似呈对数增大,衰降速度 I_{sc} 大于 V_{oc},说明电池基区受到了严重的损伤。

2020 年,高欣等用位移损伤剂量法研究了高能质子造成 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐射敏感参数衰降规律[24]。质子能量为 3,5,8,10 MeV,辐照注量在 $10^{9}\sim10^{13}$ p·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下实验测试结果表明:电池的 V_{oc},I_{sc},P_{m} 均随着辐照注量的增大而不断衰降,在相同的辐照注量下,质子能量越低,辐射敏感参数衰降越严重。文章结合电子辐照实验结果,建立了空间综合辐射环境下三结太阳电池辐射敏感参数衰降模型,并对比卫星在轨实测数据,验证了模型的正确性。

2020 年以来,王祖军等研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在不同能量、不同辐照注量率、不同入射角度条件下的质子辐照损伤效应。在北京大学串列加速器上开展质子辐照实验的能量分别为 3 和 7 MeV,在西安 200 MeV 质子应用装置上开展质子辐照实验的能量分别为 20,40,60,100 MeV,辐照注量率范围约为 $5\times10^{7}\sim1.1\times10^{9}$ p·cm^{-2}·s^{-1},辐照注量范围为 $1\times10^{11}\sim2\times10^{12}$ p·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下的实验测试结果表明:该三结太阳电池的 V_{oc},I_{sc},P_{m},EQE 等辐射敏感参数衰降程度均随质子辐照注量增大而增大,如在 3 MeV 质子辐照下,辐照注量分别为 1×10^{11} 和 1×10^{12} p·cm^{-2} 时,P_{m} 衰降分别约 11.5%和 33.4%;而在 7 MeV 质子辐照下,辐照注量分别为 1×10^{11} 和 1×10^{12} p·cm^{-2} 时,P_{m} 衰降分别约 8.8%和 21.1%;在 3 MeV 质子辐照下,辐照注量为 1×10^{12} p·cm^{-2} 时,不同入射角度(与芯片表面垂直方向的角度分别为 0°,30°,60°)质子辐照诱发的衰降程度差别不明显。

2021 年,张延清等开展了柔性倒置膜型 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的质子辐照实验研究[25]。质子能量分别为 1,3,5 MeV,辐照注量率为 5×10^{9} p·cm^{-2}·s^{-1},最大辐照注量为 5×10^{13} p·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下实验测试结果表明:该三结太阳电池的 V_{oc},I_{sc},P_{m},EQE 的衰降程度均随辐照注量增大而增大,V_{oc} 的衰降程度大于 I_{sc};在相同的辐照注量下,在该辐照实验的质子能量范围内,质子能量越低,辐射敏感参数衰降越严重。

综合分析国内外研究团队已报道的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的质子辐照损伤效应实验研究进展情况,得到了质子辐照损伤诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池主要辐射敏感参数衰降的实验规律和损伤机理。实验结果表明:不同能量质子辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐射敏感参数衰降损伤程度不同;GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的中电池 GaAs 的抗质子辐照能力较弱,是影响三结太阳电池性能的主要因素。尽管相关报道从少数载流子扩散长度减小、缺陷充当载流子复合中心来分析辐射敏感参数的退化机理,但对不同辐照注量和能量的质子在三结电池中产生缺陷的能级、密度、俘获截面、位置及分布等信息报道较少,需要进一步开展相关实验与测试研究。

1.3 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的其他粒子或射线辐照实验研究进展

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池受到的空间辐射损伤主要由空间电子、质子引起,而在实际的空间辐射环境中,还存在其他辐射粒子或射线的影响,如银河宇宙射线中包含约 87%的质子、12%的 α 粒子和 1%的重离子;太阳粒子事件中包含约 96.4%的质子、3.5%的 α 粒子和 0.1%的重离子[26]。开展空间核能应用研究时,还需考虑中子和 γ 射线的影响。近年来,国内外的多个研究团队也开展了少量的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的其他辐射粒子或射线辐照实验研究。

2018 年,Xu 等研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的 α 粒子辐照损伤效应[27]。α 粒子的能量为 5.1 MeV,辐照注量范围为 $2\times10^{7}\sim5\times10^{9}$ cm^{-2}。在 AM0 条件下的测试结果表明:三结电池的 V_{oc},I_{sc},P_{m} 的衰降幅度均随着位移损伤剂量的增大而增大;在辐照注量为 1×10^{9} 和 5×10^{9} cm^{-2} 时,GaAs 中电

池光谱响应在 650～900 nm 显著退化，而顶电池 GaInP 光谱响应在 350～650 nm 几乎没有降低，说明顶电池 GaInP 有更强的抗 α 粒子辐照能力。通过对比质子辐照实验结果，文章认为：在相同辐照注量下，α 粒子诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照损伤比 1 和 3 MeV 质子更严重。

2019 年，颜媛媛等研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的重离子辐照损伤特性[15]。重离子 Xe 的能量为 4.8 MeV，辐照注量率为 5×10^{7} cm$^{-2}\cdot$s^{-1}，辐照注量分别为 5×10^{7}，1×10^{8}，5×10^{8}，1×10^{9}，1×10^{10} cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下的测试结果表明：三结电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_{m}，F_{F} 衰降幅度均随着 Xe 离子辐照注量的增大而增大，在低辐照注量下衰降较小，但当辐照注量达到 1×10^{10} cm^{-2} 时，对电池造成的损伤较大，I_{sc} 衰减到辐照前的 58%，V_{oc} 衰减到辐照前的 68%；电池量子效率衰降规律与辐照注量相关，当辐照注量小于 1×10^{9} cm^{-2} 时，量子效率在长波段衰降明显，GaAs 中电池受损严重，当辐照注量大于 1×10^{9} cm^{-2} 时，量子效率在短波段衰降明显，GaInP 顶电池受损严重。

2020 年以来，王祖军等研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的反应堆中子辐照损伤效应。中子辐照实验在西安脉冲反应堆上开展，1 MeV 等效中子辐照注量分别为 1×10^{11}，1×10^{12}，1×10^{13}，1×10^{14} n$\cdot$cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下的实验测试结果表明：该三结太阳电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_{m}，EQE 等辐射敏感参数衰降程度均随中子辐照注量增大而增大；当 1 MeV 等效中子辐照注量分别为 1×10^{12} 和 1×10^{14} n$\cdot$cm^{-2} 时，V_{oc} 衰降分别约 3.8% 和 19.2%。此外，王祖军等还研究了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在西安 200 MeV 质子应用装置上分别开展的 7 MeV 负氢离子、氢原子、质子辐照下的损伤效应，初步分析了其辐照损伤效应实验规律。

2021 年，Ryabtseva 等研究了 GaInP/InGaAs/Ge 三结太阳电池的 γ 射线、中子、电子的辐照损伤特性[28]。γ 射线由 ^{60}Co γ 射线源产生，剂量率为 262.5 rad(Si)/s；中子能量为 0.1 MeV，辐照注量范围为 $10^{11}\sim10^{14}$ n$\cdot$cm^{-2}；电子能量为 7 MeV，辐照注量在 $3\times10^{12}\sim1\times10^{15}$ e$\cdot$cm^{-2}，用位移损伤剂量法对辐照损伤进行评估。在 AM0 条件下的实验测试结果表明：经辐照注量为 1×10^{14} n$\cdot$cm^{-2} 的中子辐照后，三结太阳电池的最大输出功率和转化效率衰降幅度最明显；经 γ 射线辐照后，三结太阳电池各参数衰降程度基本相同；在最大辐照注量下，顶电池 GaInP 的功率降低了 19%，InGaAs 中电池的功率降低了 34%，Ge 底电池的功率降低了 47%。文章基于位移损伤剂量法分析实验结果认为：γ 射线、中子、电子造成的三结电池参数衰降可以用同一条拟合曲线进行表示，该曲线可以作为预测太阳电池在轨运行寿命的依据。

已开展的 GaInP/InGaAs/Ge 三结太阳电池的 α 粒子、重离子、中子、γ 射线辐照实验主要参考了电子和质子辐照实验方法，研究了辐射粒子或射线能量、辐照注量变化对电池辐射敏感参数衰降的影响规律，这些辐射粒子或射线辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐射敏感参数的衰降也比较显著，随着空间探测与应用的拓展，特别是行星际深空探测、空间核动力应用的发展，除电子和质子外的其他辐射粒子或射线诱发 GaInP/InGaAs/Ge 三结太阳电池的辐照损伤效应也需要进一步关注。

2　辐照损伤效应仿真模拟研究进展

鉴于开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照实验研究，需要有开展辐照实验的辐射模拟装置、开展辐射敏感参数测试的评测系统，研究周期相对较长、成本较高，GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应的仿真模拟研究逐渐受到重视。通常采用基于计算机辅助设计(Technology Computer Aided Design，TCAD)的商用半导体器件仿真模拟软件(如 Silvaco TCAD、wxAMPS TCAD、PC1D TCAD 等)开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应仿真模拟。应用 TCAD 工具开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应仿真模拟，不仅能获得辐照前后辐射敏感参数衰降的仿真模拟结果，还能获得太阳电池内部载流子浓度、少数载流子寿命等信息，为开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤机理分析和抗辐射加固设计提供理论依据。多个研究团队均已开展了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应仿真模拟研究。

2008 年，Sato 等应用一维器件建模程序 PC1D 模拟了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在不同能量质子辐照下的性能衰降[29]。模拟了能量分别为 30，150 keV 和 3，10 MeV 的质子辐照后太阳电池的 EQE 的衰降，基于载流子去除率和损伤系数分析了 GaInP/InGaAs/Ge 各子电池的退化机理，仿真模拟

得到的 I_{sc} 和 V_{oc} 值与辐照实验结果吻合较好，误差为5%左右。

2014年，Cappelletti等应用PC1D模拟了GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池中各子电池在电子辐照下电性能的退化行为[30]。电子能量为1 MeV，辐照注量为 4×10^{15} cm^{-2}。通过辐射复合寿命、少数载流子寿命损伤常数和载流子去除率模型研究了p型和n型GaAs结构的基极和发射极载流子浓度对 P_m 的影响。仿真模拟结果表明：太阳电池的抗辐射耐受性是掺杂浓度的函数。当同时考虑最低基极载流子浓度和最低发射极载流子浓度时，得到最高的 P_m。

2015年，郭宏亮等应用PC1D模拟了三结砷化镓电池在高能电子和低能质子辐照条件下的电性能退化规律[31]。通过光谱响应、光致发光光谱和时间分辨荧光光谱分析了其辐照损伤机理。以实验为基础，应用PC1D软件模拟了三结砷化镓太阳电池的电性能行为。仿真模拟结果表明：少数载流子寿命的降低会导致电池的能带结构和内部电流的改变，进而导致电池的宏观电学性能发生改变。

2015年，齐佳红等应用PC1D程序研究了GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池在1 MeV电子辐照后的 I_{sc} 退化机制，模拟了少数载流子扩散长度随电子辐照注量的变化关系[11]。仿真模拟结果表明：少数载流子扩散长度随辐照电子注量增大而减小，少数载流子扩散长度的缩短是太阳电池 I_{sc} 衰降的主要原因。

2016年，Ochoaa等应用Silvaco TCAD软件模拟了LM GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池及各子电池在10 MeV质子辐照后的退化行为，并进行地面辐照模拟实验进行验证[32]。仿真模拟结果表明：相同的辐照注量下，GaAs中电池衰降最严重，在GaInP顶电池和Ge底电池只出现轻微的衰降；该三结太阳电池的 P_m 衰降约12%，V_{oc} 的衰降约为70 mV。

2016年，付帅等应用wxAMPS软件构建了高效GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的中电池模型，并对电池抗辐照性能进行模拟研究[33]。仿真模拟结果表明：当辐照缺陷密度较小时，缺陷对中电池的电性能影响较小；当缺陷密度较大时，电性能的下降与电子辐照注量值的对数成正比；电池电性能的下降直接归因于量子效率的下降、饱和暗电流的增强以及并联电阻的衰降。

2019年以来，王祖军等以GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池为研究对象，开展了能量为0.7，1，3，5，10 MeV的质子辐照损伤模拟研究，建立了三结太阳电池结构模型和不同能量质子辐照模型，获得了不同质子辐照条件下的 I-V 曲线，光谱响应曲线，得到了该三结太阳电池各辐射敏感参数随质子能量变化的仿真模拟规律[34]。仿真模拟结果表明：质子辐照会在三结太阳电池中引入位移损伤缺陷，使少数载流子扩散长度退化幅度随质子能量的减小而增大，从而导致电学参数的退化随质子能量的减小而增大；相同辐照条件下，中电池光谱响应衰降幅度远大于顶电池光谱响应退化幅度，中电池长波范围内光谱响应的衰降幅度比短波范围更大，中电池相关电学参数的退化主要来源于基区损伤。此外，王祖军团队还开展了缺陷类型对GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池GaAs子电池性能影响的模拟研究[35-36]。采用wxAMPS软件模拟了1 MeV电子辐照产生不同类型缺陷对短路电流、开路电压、填充因子、最大输出功率、转换效率和外量子效率的影响。仿真模拟结果表明：在相同缺陷浓度和载流子俘获截面条件下，当缺陷能级接近本征费米能级时，GaAs子电池的辐射敏感参数衰降更严重；受主型缺陷引起的辐射敏感参数衰降程度比施主型缺陷更显著，E2(E_c-0.14 eV)和E5(E_c-0.96 eV)是导致GaAs子电池退化的主要缺陷。

国内外已开展的GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池辐照损伤效应仿真模拟工作，能模拟辐照前后三结太阳电池辐射敏感参数的衰降规律，并通过分析GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池的少数载流子寿命来揭示辐射敏感参数退化机理。但在辐照损伤效应建模及模型校验方面仍需深入研究。

3 抗辐射加固技术研究进展

空间太阳电池的发展过程中一方面是不断探索提高光电转换效率、降低太阳电池的功率与质量比；另一方面是不断设计提高太阳电池的抗辐射能力。目前，开展太阳电池的抗辐射加固技术路线主要有两条：主动加固和被动加固[37]。主动加固是通过改进和完善太阳电池器件及结构设计，如加装光学减反射结构、增加减反射涂层、改进电池活性区结构等，提高对入射光子的收集效率，降低辐照对太阳电池的性能退化的影响。主动加固是在器件设计层面减小太阳电池辐照损伤影响，增强太阳电池的抗辐

射能力。被动加固是在太阳电池表面增加盖片形成辐射屏蔽层，从而减少辐照对太阳电池的影响。目前在轨运行卫星的太阳电池通常都加装了石英玻璃盖片作为辐射屏蔽层，石英玻璃对质子的防护效果较好，对于电子的防护效果相对较差，例如，75 μm 厚的石英玻璃盖片可以阻挡能量小于 2.8 MeV 的质子，但只能对能量小于 200 keV 的电子起屏蔽作用[38]，且玻璃盖片增加了太阳电池阵的重量，降低了太阳电池的功率与质量比。

分布式布拉格反射器(DBR)是常用光学减反射结构，是由两种折射率不同的材料交替生长形成的周期性结构，对一定波长范围内的光子反射率可高达 90%以上[39]，可以用作太阳电池的背反射器，提高太阳电池的光子吸收转化效率，减轻辐照诱发太阳电池少数载流子扩散长度衰降对性能的影响。结合材料的生长条件和晶格匹配，可供选择的嵌入三结太阳电池中的 DBR 材料主要有 AlAs/GaAs，AlInP/GaInP，AlInP/GaAs，GaInP/GaAs，$Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ 五种[40]，通过改变材料掺杂组分和膜层厚度，可以调节 DBR 结构反射的光子波长范围，从而能选择适合某一特定太阳电池的 DBR 结构。在 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池结构组分中，GaAs 中电池的 I_{sc} 最小，受辐照后 I_{sc} 衰降明显，导致与顶中电池电流失配，使 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池性能退化更严重，因此 GaAs 中电池是限制三结电池性能的主要因素。要提高 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的抗辐照性能，需要提高各子电池(主要是中电池)的抗辐射能力，在子电池中生长 DBR 结构可以将未被吸收的光子反射回电池基区，实现对光子的二次吸收，增加子电池的入射光子应用率，提高光电流密度，在设计上就可以减小子电池的基区厚度，从而降低辐照损伤的影响，提高抗辐照能力。

在太阳电池表面设置减反射涂层，可以减少太阳电池对特定波长范围内入射光的反射，提高太阳电池的转化效率和抗辐照能力。不同材料的减反射涂层反射的光波长范围不同，目前多结太阳电池主要使用的是 TiO_2/Al_2O_3 双层减反射涂层，可以对多结电池主要吸收波段的光进行反射，有效提高太阳电池的转化效率。探索更高效的减反射涂层材料也是太阳电池抗辐射加固的重要途径。

2010 年，Emelyanov 等研究了 DBR 结构 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗电子辐照能力[41-42]。DBR 结构加装在该三结电池的顶电池和中电池中，电子能量为 1 MeV，辐照注量为 3×10^{15} e·cm^{-2}，光谱响应和光电流的实验测试结果表明：辐照前，有无 DBR 结构的三结太阳电池的 I_{sc} 近似相同；辐照后，带有 DBR 结构的三结太阳电池比无 DBR 结构的三结太阳电池的 I_{sc} 提高了 0.5～1.0 mA·cm^{-2}，转化效率提高了 1%～2%。文章分析实验结果认为：在该三结太阳电池中加装 DBR 结构，可以减小子电池基区厚度，有效提高三结太阳电池的抗辐射能力。

2014 年，Skachkov 等研究了 DBR 结构对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗电子辐照能力的影响[43]。DBR 结构加装在中电池 GaAs，将电池基区厚度 3 μm 减小到 1.9 μm，电子能量 1 MeV，辐照注量分别为 3×10^{13}，1×10^{14}，1×10^{15}，1×10^{16} e·cm^{-2}。电池 I-V 特性和光谱响应测试结果表明：该三结太阳电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m，EQE 的衰降幅度都随着辐照注量的增大而增大，与未加装 DBR 结构的电池相比，优化后的三结电池参数衰降幅度都明显降低，抗辐射能力提高 10%以上。文章分析实验结果认为：使用 DBR 结构对空间三结太阳电池进行优化，可以减少材料中辐照诱发缺陷的产生，提高其抗辐照能力。

2017 年，马大燕等设计了一种应用于 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的新型 DBR 结构，并研究了采用该结构的太阳电池抗电子辐照能力[40]。DBR 结构包含 15 对 $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$，电子能量 1 MeV，辐照注量率为 1×10^{11} cm^{-2}·s^{-1}。在 AM0 和 25 ℃条件下的测试结果表明：该 DBR 结构在中心波长 850 nm 处反射率高达 96%；辐照后，包含 DBR 结构的新电池光谱响应要明显高于未优化电池的光谱响应。基于 PC1D 模拟文章认为：带有 DBR 结构的三结电池的多子去除率和少子扩散长度损伤系数均明显低于未优化的电池，表明 DBR 结构可以提高三结太阳电池的抗辐照能力。

2019 年，Sertel 等研究了减反射涂层对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐射能力的影响[44]。两种减反射涂层分别为单层 Ta_2O_5 和双层 SiO_2/Ta_2O_5，在 AM1.5 条件下测试结果表明：单层 Ta_2O_5 可以使三结电池光反射率降低到 14%，且电池转化效率提高 7%；双层 SiO_2/Ta_2O_5 可以使电池光反射率降低到 7%，且电池转化效率提高 19%。分析实验结果认为：与单层 Ta_2O_5 相比，双层 SiO_2/Ta_2O_5 在增强抗反射能力，降低光反射损耗方面更

有效，是合适的三结太阳电池减反射涂层。

2019 年，郭宏亮等研究了 AlGaInP/AlGaAs/GaAs 三结太阳电池抗辐照性能的最优结构[45]。文章针对均匀损伤、非均匀损伤两种情况下电池的性能衰降建立对应的数学模型，在模型的基础上，经过空间能谱分析、缺陷分布分析、电性能退化预测以及结构参数优化四个步骤后，得到了三种不同服役条件下 AlGaInP/AlGaAs/GaAs 的厚度组合优化结构参数为：5 μm/0.8 μm/1.0 μm，0.6 μm/1.0 μm/1.8 μm，0.6 μm/0.8 μm/1.2 μm。基于 Simulink 仿真，文章分析认为：增加顶电池 AlGaInP 厚度可以增强屏蔽作用，但是会吸收更多的光子导致电池总电流减少，需要根据任务情况合理选择；对于中电池和底电池，减小厚度可以提高抗辐照性能，但是会损失部分初始效率。

2020 年，张炜楠等基于 LM 三结太阳电池各子电池的吸收波长，使用 EssentialMacleod 程序设计了 $TiO_2/Al_2O_3/MgF_2$ 三层减反射涂层[37]。仿真模拟结果表明：当 TiO_2 层厚为 50.05 nm，Al_2O_3 层为 71.43 nm，MgF_2 层为 115.27 nm 时，该减反射涂层具有最优平均反射率。还设计了适用于该多结太阳电池的 DBR 结构，仿真模拟结果表明：当 DBR 结构为 18 个周期的 $GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 时，其具有 94.78%的反射率，且此时具有最佳的经济成本。

2020 年，颜平远等研究了带有 DBR 结构的晶格失配 GaInP/Ga(In)As/Ge 三结太阳电池抗电子辐照性能[46]。根据光学膜系软件 Macleod 模拟结果，选择 16 对 $GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 的 DBR 结构对三结太阳电池进行结构优化，电子的能量为 1 MeV，辐照注量率为 1×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1}，辐照注量分别为 1×10^{15}，2×10^{15}，5×10^{15} e·cm^{-2}。在 AM0 和室温下的测试结果表明：三结电池的 V_{oc}，I_{sc}，P_m 等参数的衰降幅度均随着辐照注量的增大而增大，并且 I_{sc} 衰降速度大于 V_{oc}，EQE 在整体上呈退化趋势，但在 820～880 nm 有明显上升的趋势。文章分析实验结果认为：DBR 结构在高反射带宽区域将入射光反射回有源区内进行二次吸收，相对提升了 Ga(In)As 中电池的 I_{sc}，该结构对提高三结电池抗辐照性能具有积极作用。

2022 年，高慧等研究了应用 DBR 结构的 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳电池抗电子辐照性能[39]。选用三种中心反射波长分别为 865，875，885 nm 的 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ DBR 结构作为 GaInAs 中电池的背反射器，选取能量 1 MeV 的电子束，辐照剂量率范围为 5×10^{10}～2×10^{11} e·cm^{-2}·s^{-1}，累积剂量为 10^{15} e·cm^{-2}。在 AM0 和 25 ℃条件下的测试结果表明：DBR 结构对顶电池 GaInP 的光学反射特性影响几乎可以忽略，对 GaInAs 中电池的光子吸收规律有很大影响；随着 DBR 反射波段的红移，F_F 和转化效率等参数表现出有规律的增长，I_{sc} 和 V_{oc} 基本无变化。分析实验结果认为：带有 DBR 结构的晶格失配 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的光学特性和抗辐照能力与 DBR 的中心反射波长有密切联系，在设计抗辐照高效多结太阳电池时，需要考虑中电池带隙与 DBR 结构中心反射波长之间的关系。

提高 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐照能力是延长其在轨寿命的重要途径，综合分析目前国内外在 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐射加固方面的研究成果表明：对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐射加固主要通过加装光学减反射结构和增加减反射涂层方式，对 DBR 结构的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐射加固研究较多，并且取得了明显的加固效果。对主动加固的材料研究相对较少，探索新型耐辐照材料和抗辐照加固结构仍有待深入研究。

4 太阳电池在轨辐照损伤预估方法

对太阳电池在轨遭受辐照损伤后的性能退化进行预估是开展太阳电池辐照损伤效应研究的一项重要航天工程应用课题。预估方法通常为：首先，开展一定量的地面等效模拟辐照实验，模拟太阳电池在轨遭受的空间辐射损伤；然后，结合实验结果和理论分析，进行科学合理的推算，得到太阳电池在轨性能退化的初步规律；最后，根据太阳电池所处轨道的空间辐射环境，结合已得到的太阳电池在轨性能退化规律及在轨实测数据修正，对太阳电池在轨性能退化进行预估。目前，广受认可的太阳电池在轨辐照损伤预估方法主要有两种：等效注量法(Equivalent Fluence Method)和位移损伤剂量法(Displacement Damage Dose Method)。

等效注量法于 1982 年由美国喷气动力实验室(JPL)的 Tada 等首先提出[47]，其基本思想是以辐照实验数据为基础，将不同类型、不同能量的辐射粒子或射线辐照诱发太阳电池性能退化程度通过相对损伤系数(Relative Damage Coefficient，RDC)进行工程近似等效，实现通过开展太阳电池的地面辐照

模拟实验来等效模拟实际空间环境中所遭受的空间辐射损伤。等效注量法的主要步骤如下[9,47-48]：

(1)通过开展大量的地面辐照模拟实验，得到不同类型、不同能量的辐射粒子或射线辐照诱发太阳电池辐射敏感参数退化到某一规定的程度(如 P_m 衰降约 20%或根据实际任务所确定的特定退化程度)时的临界辐照注量。

(2)通常以 1 MeV 电子的临界辐照注量为基准，计算其他辐射粒子或射线的临界注量与 1 MeV 电子的临界辐照注量之比，得到辐射粒子或射线相对于 1 MeV 电子的 RDC；通常以 10 MeV 质子的临界辐照注量为基准，得到不同能量质子的 RDC；以实验结果为基础，拟合 1 MeV 电子辐照下电池的电学性能退化曲线。

(3)根据太阳电池在轨空间辐射环境，计算空间辐射粒子或射线的能谱，结合相对损伤系数得到具有空间连续能谱的辐射粒子或射线等效为 1 MeV 电子的等效注量。

(4)根据等效注量和 1 MeV 电子辐照下电池的电学性能退化曲线，实现对空间辐射环境中应用的太阳电池在轨性能退化进行预估。

等效注量法以辐照实验数据为基础，通过 RDC 进行工程近似等效，在 Si，GaAs 单结太阳电池的在轨辐照损伤预估方面取得了良好的应用效果，该方法可实现对 V_{oc}，I_{sc}，P_m 在轨退化进行预估，目前在国内外仍然得到广泛应用。然而，该方法还存在一定的局限性，例如，需要通过开展大量的地面辐照模拟实验来计算 RDC，导致成本高、周期长，且实际空间辐射环境中辐射粒子或射线是全向辐照，太阳电池表面有防护盖片，而等效注量法中的 RDC 是通过地面单一能量粒子从芯片表面垂直方向辐照获得的数据，因此会存在一定的差异[9]。此外，太阳电池种类较多，不同种类太阳电池辐照实验数据及 RDC 的通用性不强。

位移损伤剂量法于 1994 年由美国海军实验室(NRL)的 Summers 等首先提出[49]，其基本思想是空间辐射损伤诱发太阳电池性能退化主要由空间位移损伤引起，而空间位移损伤主要源于空间辐射粒子或射线与太阳电池相互作用而沉积的非电离能量损失(Nonionizing Energy Loss，NIEL)，因此以 NIEL 为基础，将辐射粒子或射线的辐照注量转化为位移损伤剂量(D_d)，得到太阳电池辐射敏感参数退化随 D_d(辐照注量与 NIEL 的乘积)变化的关联曲线[9]。在预测太阳电池在轨运行性能评估时，只需要计算空间辐射粒子或射线能谱对应的等效 D_d，对照地面等效模拟实验得到的太阳电池性能退化随 D_d 变化的关联曲线，即可实现对空间环境下太阳电池在轨性能退化进行预估。

相比于等效注量法，位移损伤剂量法从空间辐射损伤诱发太阳电池性能退化的物理机制出发，具有明确的物理意义，且所需开展的地面辐照模拟实验相对较少，工程应用方便、简洁。然而，该方法也存在一定的局限性，例如，由于低能质子不能入射到双结或多结太阳电池的空间电荷区，导致 V_{oc} 和 P_m 退化程度较小，因而实验结果偏离了太阳电池性能退化随 D_d 变化的关联曲线；由于电子和质子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的 V_{oc} 和 I_{sc} 退化曲线均不能通过 D_d 转换因子使两者重合，导致位移损伤剂量法无法对太阳电池进行在轨退化预估[9]。针对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的在轨辐照损伤预估，尽管采用改进的等效注量法和位移损伤剂量法做了一些尝试[9,50]，验证了改进后的预估方法具有可行性，但 GaInP/GaAs/Ge 电池在轨辐照损伤预估方法仍然需要进一步完善，目前仍缺少大量的 GaInP/GaAs/Ge 电池辐照实验数据为预估方法提供基础数据支撑。在对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的在轨辐照损伤预估准确度要求较高时，可以采用多种方法相结合开展预估、并通过一定的在轨实测数据对预估模型进行校验和修正。

5　总结与展望

随着 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在航天器空间电源系统中的广泛应用，其遭受的空间辐射损伤问题日益突出，结合研究团队在 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照实验和仿真模拟方面已开展的工作及国内外 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应研究现状，本文从辐照实验、仿真模拟研究、抗辐射加固技术、损伤预估方法等方面综述了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应及加固技术研究进展。

目前国内外开展的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应研究主要以辐照损伤效应实验和规律分析为主，尚未形成辐照实验、仿真模拟、损伤机理、在轨辐照损伤预估和加固设计的体系研究。开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池不同能量粒子

辐照损伤等效及不同类型辐射粒子(如电子与质子)辐照损伤等效研究,仍然缺乏较系统的辐照实验数据支撑。针对当前存在的问题,梳理了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应研究中亟待解决的关键技术问题:

(1)辐射粒子或射线辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池缺陷产生及其影响机制研究。目前,对辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池宏观辐射敏感参数衰降的实验规律研究较多,但从微观物理机制方面深入揭示辐照损伤机理的研究相对较少,特别是辐照诱发缺陷的实验测试报道较少,没有明确辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池性能退化起主要作用的缺陷有哪些种类,缺少不同辐射粒子或射线辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池产生缺陷的能级、密度、俘获截面、位置及分布等信息,尚未建立辐照诱发缺陷数据库。

(2)辐射粒子或射线辐照诱发 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池宏观性能参数衰降的等效关系研究。国外针对 Si,GaAs 单结太阳电池辐照损伤效应的长期研究,建立了较为完善的辐照实验数据库,对不同辐射粒子或射线辐照诱发单结太阳电池性能衰降的等效关系研究较为完善,但三结太阳电池采用多结叠层,单结太阳电池相应的等效规律并不完全适用于多结太阳电池,由于尚未建立 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池基础辐照实验数据库,GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池性能退化曲线及等效因子的确立仍需要大量的基础辐照实验数据支撑。

(3)GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应全物理图景的联合仿真模拟方法研究。结合蒙特卡罗模拟、分子动力学模拟、第一性原理、TCAD 仿真等,开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应全物理图景的联合仿真模拟研究。在辐照实验数据校验的基础上,不断完善 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应仿真模型,提高仿真模拟数据的可信度,实现仿真模拟数据与辐照实验数据共同组成评估 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤的基础数据支撑。

(4)GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在极端空间环境下的多因素耦合作用机制研究。GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在实际的空间环境中应用时,会同时遭受多种辐射粒子或射线的协和作用,目前关于 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池多种辐射粒子或射线的协和效应机制的研究报道较少。此外,在极端空间环境下,GaInP/GaAs/Ge 三结电池在轨还面临温湿度波动范围大、空间光照度低、强辐射等多因素耦合作用,相应的损伤机制研究对开展深空探测的航天器高可靠、长寿命运行具有重要意义。

(5)GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在轨辐照损伤预估方法研究。由于地面模拟辐照实验条件与真实的空间辐射环境存在差别,在地面模拟辐照实验数据与在轨实测数据比对过程中,需要进行修正,需要监测大量的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池在轨实测数据,目前国内外关于在轨实测数据报道较少,需要建立在轨实测数据库,为地面模拟辐照实验条件确立及辐照损伤效应仿真模型的完善提供依据。

围绕上述问题,项目组将系统深入开展 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应研究,为开展 GaInP/GaAs/Ge 三结电池辐照损伤效应实验方法标准制定、损伤机理分析、在轨寿命预估及抗辐射加固技术的体系研究提供理论指导和实验技术支持。

参考文献:

[1] Easton R L, Votaw M J, Vanguard I. IGY satellite (1958 beta)[J]. Rev. of Scientific Instrum., 1959, 30(2): 70-75.

[2] Richard K, Chris F, Peter C, et al. High-efficiency space and terrestrial multijunction solar cells through bandgap control in cell structures[C]// Conf. Record of The Twenty-ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2002: 776-781.

[3] Sharps P R, Stan M A, Aiken D J, et al. Ultra high-efficiency advanced triple-junction (ATJ) solar cell production at emcore photovoltaics [C]// 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. (IECEC), 2002: 333.

[4] 王向武,张 永. 砷化镓三结太阳电池研究现状与发展趋势[C]// 第十二届全国 MOCVD 学术会议,厦门,2012: 1-10.

[5] Sharps P R, Aiken D J, Stan M A, et al. Proton and electron radiation data and analysis of $GaInP_2$/GaAs/Ge solar cells[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2002, 10(6): 383-390.

[6] Baur C, Meusel M, Dimroth F, et al. Analysis of the radiation hardness of triple-and quintuple-junction space solar cells[C]// Conf. Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2005: 541-551.

[7] Sugimoto H, Tajima M, Hase S, et al. Luminescence analysis of radiation effects in multijunction solar cells for space[C]// Conf. Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2005: 830-833.

[8] 牛振红,郭 旗,任迪远,等. 一种国产 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照特性[J]. 核技术,2007, 30(1): 37-39.
Niu Zhenhong, Guo Qi, Ren Diyuan, et al. Effects of electron irradiation on a home-made type of triple-junction GaInP/

GaAs/Ge solar cell[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(1): 37-39.

[9] 胡建民. GaAs 太阳电池空间粒子辐照效应及在轨性能退化预测方法[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.
Hu Jianmin. Prediction method of space particle irradiation effect and in orbit performance degradation of GaAs solar cells [D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2009.

[10] Imaizumi M, Morioka C, Sumita T, et al. Radiation degradation and damage coefficients of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cell by low-energy electrons[C]// 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2011: 001579-001582.

[11] 齐佳红，胡建民. 电子辐照 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池短路电流退化机制研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报，2015(4)：89-91.
Qi Jiahong, Hu Jianmin. Study on short circuit current degradation mechanism of electron irradiated GaInP/GaAs/Ge three junction solar cells[J]. J. of Natural Science of Harbin Normal University, 2015(4): 89-91.

[12] Tex D M, Nakamura T, Imaizumi M, et al. Direct evaluation of influence of electron damage on the subcell performance in triple-junction solar cells using photoluminescence decays[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-8.

[13] 李占行，艾尔肯阿不都瓦衣提，玛利娅黑尼，等. 1 MeV 电子辐照下晶格匹配与晶格失配 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐射效应研究[J]. 中国发光学报，2017，38(4)：463-469.
Li Zhanhang, Aierken Abuduwayiti, Maliya Heini, et al. Radiation effects of lattice matched and upright metamorphic GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells by 1 MeV electrons [J]. Chinese J. of Luminescence, 2017, 38(4): 463-469.

[14] Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Yang Xie, et al. Radiation effects in GaInPGaAsGe triple junction solar cells irradiated by 1 MeV and 10 MeV electrons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2021, 1018: 165763.

[15] 颜媛媛. 空间卫星用 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池辐照损伤效应研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2019.
Yan Yuanyuan. Research on radiation damage effects of GaInP/GaAs/Ge solar cells for space satellites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[16] Park S, Cavani O, Lefèvre J, et al. Space degradation of triple junction solar cells at low temperatures: Ⅱ-electron irradiation[J]. Inter. J. of Energy Research, 2021, 45(12): 17942-17954.

[17] 李　娟. 倒置晶格失配 GaInP/GaAs/InGaAs 太阳电池的辐射效应研究[D]. 昆明：云南师范大学，2021.
Li Juan. Study on radiation effect of inverted lattice mismatch GaInP/GaAs/InGaAs solar cells [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2021.

[18] Sumita T, Imaizumi M, Matsuda S, et al. Proton radiation analysis of multi-junction space solar cells [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2003, 206: 448-451.

[19] Yamaguchi M, Ekins-Daukes N J, Lee H, et al. Analysis for radiation-resistance of InGaP and GaAs sub-cells for InGaP/GaAs/Ge 3-junction solar cells[C]// 2006 IEEE 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conf., 2006.

[20] 王　荣，刘运宏，孙旭芳，等. 国产高效 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的低能质子辐射效应[J]. 半导体学报，2007(10)：1599-1602.
Wang Rong, Liu Yunhong, Sun Xufang, et al. Low-energy proton radiation effect of domestic high-efficiency GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells[J]. J. of Semiconductors, 2007(10): 1599-1602.

[21] Hu Jianmin, Wu Yiyong, Xiao Jingdong, et al. Degradation behaviors of electrical properties of GaInP/GaAs/Ge solar cells under 200 keV proton irradiation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92(12): 1652-1656.

[22] Maximenko S I, Messenger S R, Hoheisel R, et al. Characterization of high fluence irradiations on advanced triple junction solar cells[C]// 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC), 2013.

[23] Park S, Bourgoin J C, Sim H, et al. Space degradation of 3J solar cells: Ⅰ—Proton irradiation [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2018, 26(10): 778-788.

[24] 高　欣，杨生胜，冯展祖，等. 空间三结砷化镓太阳电池位移损伤效应研究[J]. 太阳能学报，2020，41(2)：290-295.
Gao Xin, Yang Shengsheng, Feng Zhanzu, et al. Research on displacement damage effect of space triple-junction GaAs solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(2): 290-295.

[25] Zhang Yanqing, Zhou Jiaming, Liu Chaoming, et al. High energy proton radiation effect on flexible thin-film inverted metamorphic triple-junction solar cell [J]. Atomic Energy Science and Technol., 2021, 55(12): 2216-2223.

[26] Bourdarie S, Xapsos M. The near-earth space radiation environment[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2008, 55(4): 1810-1832.

[27] Xu J, Guo M, Lu M, et al. Effect of alpha-particle irradiation on InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells[J]. Materials, 2018, 11(6): 944.

[28] Ryabtseva M V, Petrov A S, Voevodkin G S, et al. Degradation of AⅢBV/Ge triple junction solar cells irradiated by gamma-rays, electrons and neutrons[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 125: 114350.

[29] Sato S I, Miyamoto H, Imaizumi M, et al. Degradation modeling of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated with various-energy protons [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2009, 93: 768-773.

[30] Cappelletti M A, Cédola A P, Peltzer E L, et al. Computational analysis of the maximum power point for GaAs sub-cells in InGaP/GaAs/Ge triple-junction space solar

cells[J]. Semiconductor Science and Technol., 2014, 29: 115025.

[31] 郭宏亮. 高效三结 GaAs 太阳电池辐照损伤效应研究及仿真分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
Guo Hongliang. Research and simulation analysis on irradiation damage effect of high efficiency triple junction GaAs solar cells [D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2015.

[32] Ochoaa M, Yaccuzzi E, Espinet-Gonzáleza P, et al. 10 MeV proton irradiation effects on GaInP/GaAs/Ge concentrator solar cells and their component subcells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2017, 159: 576-582.

[33] 付 帅，郭宏亮，江濠鹏. 三结太阳电池高能电子损伤模拟及仿真分析[J]. 航天器环境工程，2016，33(4)：392-398.
Fu Shuai, Guo Hongliang, Jiang Haopeng. Simulation and analysis of high energy electron damage in three junction solar cells[J]. Spacecraft Environment Engin., 2016, 33(4): 392-398.

[34] 李俊炜，王祖军，石成英，等. GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池不同能量质子辐照损伤模拟[J]. 物理学报，2020，69(9)：098802.
Li Junwei, Wang Zujun, Shi Chengying, et al Proton irradiation damage simulation of GaInP/GaAs/Ge triple junction solar cells with different energy[J]. J. of Phys., 2020, 69(9): 098802.

[35] Li Junwei, Wang Zujun, Xue Yuanyuan, et al. Theoretical simulation of the degradation on GaAs sub-cell with different defects induced by 1 MeV electron irradiation[J]. Optik, 2020, 223: 165532.

[36] 王祖军，唐本奇，张 勇，等. GaAs 太阳电池 1 MeV 电子辐射效应数值模拟[J]. 核电子学与探测技术，2005，25(1)：97-103.
Wang Zujun, Tang Benqi, Zhang Yong, et al. Simulation of radiation effects on GaAs solar cell by 1 MeV electrons[J]. Nuclear Electronics & Detection Technol., 2005, 25(1): 97-103.

[37] 张炜楠. 高效多结 GaAs 太阳电池电子辐射损伤效应与优化设计[D]. 昆明：云南师范大学，2020.
Zhang Weinan. Electronic radiation damage effect and optimal design of high-efficiency multi-junction GaAs solar cells[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2020.

[38] 高 欣，杨生胜，冯展祖，等. 空间三结砷化镓太阳电池位移损伤效应研究[J]. 太阳能学报，2020，41(2)：290-295.
Gao Xin, Yang Shengsheng, Feng Zhanzu, et al. Research on displacement damage effect of space triple-junction GaAs solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(2): 290-295.

[39] 高 慧，杨瑞霞. DBR 结构设计与 GaInP/GaInAs/Ge 太阳电池性能关系[J]. 材料导报，2022，36(4)：13-18.
Gao Hui, Yang Ruixia. The relationship between DBR structure design and GaInP/GaInAs/Ge solar cell performance [J]. Materials Reports, 2022, 36(4):13-18.

[40] 马大燕，陈诺夫，陶泉丽，等. 空间用 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的抗辐照性能及退化机制研究[J]. 材料导报，2017，31(S2)：12-16.
Ma Dayan, Chen Nuofu, Tao Quanli, et al. Study on radiation resistance and degradation mechanism of GaInP/GaAs/Ge triple junction solar cells for space use[J]. Materials Reports, 2017, 31(S2): 12-16.

[41] Emelyanov V M, Kalyuzhniy N A, Mintairov S A, et al. Multijunction GaInP/GaInAs/Ge solar cells with Bragg reflectors[J]. Semiconductors, 2010, 44(12): 1600-1605.

[42] Lantratov V M, Emelyanov V M, Kalyuzhnyy N A, et al. Improvement of radiation resistance of multijunction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells with application of Bragg reflectors [J]. Adv. in Science and Technol., 2010, 74: 225-230.

[43] Skachkov A F. Optimization of the structure of a GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell with an $Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ integrated bragg reflector[J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2014, 50(4): 423-427.

[44] Sertel T, Ozen Y, Baran V, et al. Effect of single-layer Ta_2O_5 and double-layer SiO_2/Ta_2O_5 anti-reflective coatings on GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell performance[J]. J. of Alloys and Compounds, 2019, 806: 439-450.

[45] 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 三结太阳电池电子辐照性能[J]. 光学学报，2020，40(16)：212-219.
Yan Pingyuan, Tu Jielei, Abuduwayiti Aierken, et al. Electron irradiation properties of GaInP/Ga(In)As/Ge triple junction solar cells based on Bragg reflectors[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 212-219.

[46] 郭宏亮. 高效多结电池光电耦合效应与抗辐射优化设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.
Guo Hongliang Photoelectric coupling effect and radiation resistance optimization design of high-efficiency multi-junction cells [D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2019.

[47] Tada H Y, Carter J R, Anspaugh B E, et al. Solar Cell Radiation Handbook[M]. Jet Propulsion Laboratory, 1982: 21-24.

[48] Anspaugh B E. GaAs Solar Cell Radiation Handbook[M]. NASA, 1996: 96-98.

[49] Summers G P, Walters R J, Xapsos, et al. A new approach to damage prediction for solar cells exposed to different radiations[C]// 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Vonversion, 1994: 2068-2075.

[50] Messenger S R, Burke R J, Walters J H, et al. Using SRIM to calculate the relative damage coefficients for solar cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2005, 13: 119-122.

作者简介：

王祖军(1979—)，男，湖北省汉川市人，博士，研究员，从事光电器件及系统的辐照损伤效应研究。