

文章编号:0254-0096(2020)02-0290-06

空间三结砷化镓太阳能电池位移损伤效应研究

高欣¹, 杨生胜², 冯展祖¹, 崔新宇³, 王俊², 曹洲²

(1. 兰州空间技术物理研究所空间材料行为及评价技术重点实验室, 兰州 730000;
2. 兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384)

摘要: 对金属有机化合物化学气相沉淀(MOCVD)生长的三结砷化镓太阳能电池进行高能电子和质子辐照试验, 获得太阳能电池的短路电流、开路电压、最大输出功率辐射衰减数据。发现不同能量电子和质子对太阳能电池的辐射衰减系数, 可利用电子或质子的位移损伤剂量关联起来。利用该关系对中星10号卫星的三结砷化镓太阳能电池阵在轨辐射衰减进行预测, 发现太阳能电池阵在轨输出功率与地面模拟预测数据基本吻合。研究结果可为空间辐射环境中应用的三结砷化镓太阳能电池冗余设计提供参考数据。

关键词: 太阳能电池; 砷化镓; 辐射效应; 位移损伤剂量; 预测

中图分类号: TK514; V520 **文献标志码:** A

0 引言

卫星太阳能电池会受到空间带电粒子(主要是电子和质子)的辐射损伤, 导致电池的输出功率、电压、电流等参数性能衰退, 可能导致任务后期太阳能电池阵输出功率不能满足星上设备的用电需求。因此, 在设计之初就应当通过地面模拟试验掌握其在空间辐射环境中性能衰退情况。地面模拟试验一般利用电子或质子加速器辐照太阳能电池, 以便等效模拟空间环境中的电子或质子(数百 keV~百 MeV)对太阳能电池造成的辐射损伤。

我国目前在三结砷化镓太阳能电池辐射损伤评价工程方面一般采用等效 1 MeV 电子通量法, 即根据航天器轨道参数和在轨寿命, 及美国喷气推进实验室(jet propulsion laboratory, JPL)出版的单结砷化镓电池辐射数据手册^[1], 选择相应的等效 1 MeV 电子注量水平进行地面辐照试验。由于缺乏三结砷化镓电池辐射数据而采用 JPL 给出的单结砷化镓辐射数据作为三结砷化镓电池阵设计依据显然是不合理的。此外, 由于电池工艺技术的差异与改进及新型电池的出现, 以往的辐射数据存在适用性问题^[2], 因此在进行三结砷化镓太阳能电池阵冗余设计时缺乏准确可靠的试验参数输入。

本文针对中电天津电子 18 所生产的空间等级三结

砷化镓太阳能电池, 利用高能电子和质子加速器开展辐照试验, 获得辐射损伤数据, 为空间三结砷化镓太阳能电池阵设计提供输入条件。同时, 采用位移损伤剂量法分析三结砷化镓太阳能电池电学性能衰退^[3-7], 并与中星 10 号三结砷化镓太阳能电池阵在轨数据对比, 预测太阳能电池在轨性能衰退。

1 试验过程

试验用太阳能电池为金属有机化学气相法生产的面积为 2 cm×2 cm 的 InGaP₂/GaAs/Ge 三结砷化镓太阳能电池。电池辐照前的光伏参数基本一致, 短路电流 I_{sc} 约为 0.068 A、开路电压 V_{oc} 为约 2.67 V、最大输出功率 P_{max} 约为 0.156 W。使用兰州空间技术物理研究所的 ILU-6 电子加速器进行电子辐照试验; 使用北京大学 EN-18 串列加速器进行质子辐照试验。辐照电子能量分别为 1.0、1.5、2.0 MeV, 辐照质子能量分别为 3.0、5.0、8.0、10.0 MeV。样品安装在真空室中, 真空度优于 10^{-3} Pa。试验温度为室温。由于电子束具有较强的加热作用, 采用温控装置保证样品温度不高于 40 °C。电池去掉玻璃盖片辐照, 每一辐照条件下的样品数为 3 个, 取平均值。在每一能量点下, 达到规定的注量后立即取出进行测试, 使用 Spectrolab X-25 太阳模拟器测量电池辐照前后的 I-V 曲线, 测量条件为一个太阳常数, AM0, 1367 W/m², 温度为 25 °C^[8]。

收稿日期: 2017-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(11475078; 11375078)

通信作者: 高欣(1972—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事空间环境效应方面的研究。gaoxin510@163.com

2 结果和讨论

图1给出了三结砷化镓电池归一化短路电流、开路电压和最大输出功率随电子和质子辐照能量和注量的变化关系曲线。归一化指的是辐照后的性能参数与辐照前的性能参数的比值,可考察参数衰减严重程度。可以看出相同辐照注量,辐照质子能量越小,电池衰减越严重;而对于电子情况,电子能量越大,电池衰减越大。这与电子和质子的非电离能损(non-ionizing energy loss, NIEL)有关系^[3,7]。NIEL代表入射粒子传输到靶材原子

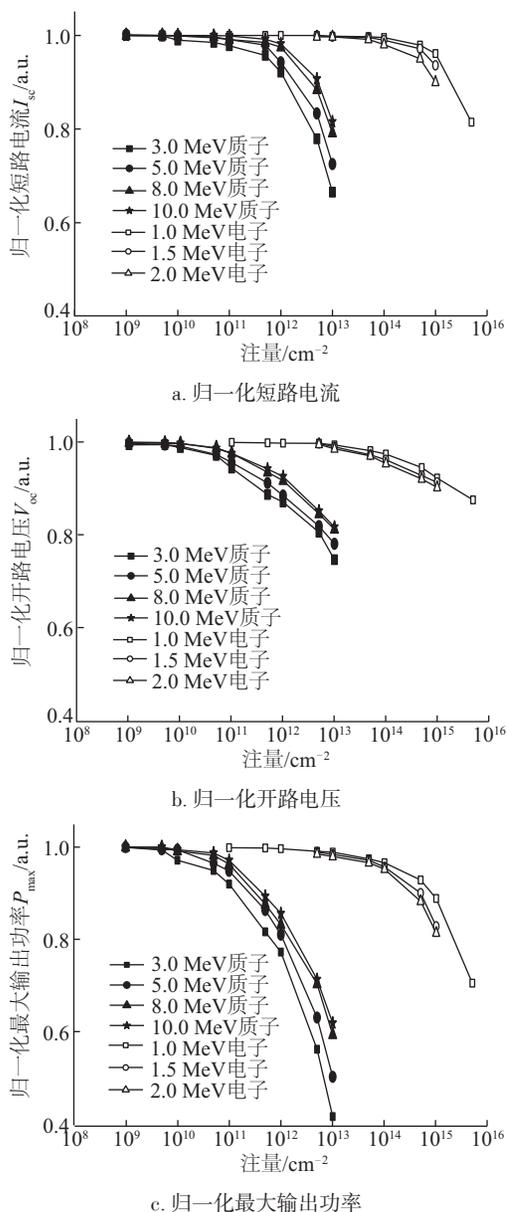


图1 三结砷化镓太阳电池归一化短路电流、开路电压和最大输出功率随注量和能量变化曲线

Fig. 1 Normalized parameters I_{sc} , V_{oc} , and P_{max} as function of electron and proton fluence under different energies

晶格的能量大小。在本试验的能量范围内,电子的NIEL随能量增大而增大,而质子的NIEL随能量的增大减小。由于太阳电池辐射损伤主要是位移损伤引起的,因此对于不同能量的电子和质子,衰减程度不同。从图1中也可看出在给定的辐照参数下,归一化短路电流和最大功率的比值,在1.0和0.3之间变化,而开路电压基本在1.0和0.7之间变化,表明辐照对开路电压影响较小。

1个InGaP₂/GaAs/Ge三结电池是由3个p-n结子电池彼此堆叠串联而形成的。三结砷化镓电池的辐射效应主要由对辐射最敏感的子电池控制。图2是三结砷化镓电池在能量为1 MeV,注量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的电子辐照前后的外部量子效率测试结果^[9]。可看出Ge子电池具有很宽的光谱吸收范围,即使在辐照后产生的光电流要大于其他2个子电池的光电流,因此Ge子电池并不限制整个电池的短路电流^[10]。而辐照后砷化镓子电池衰减比InGaP₂子电池更快,因此成为限制电池电流的关键因素。

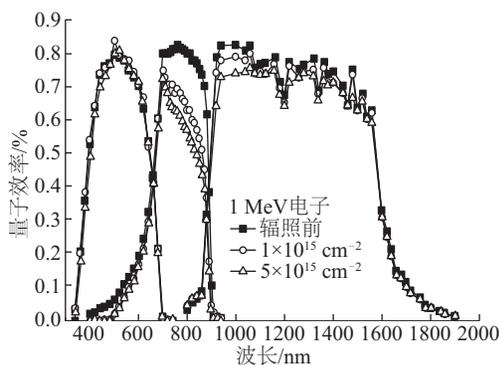


图2 电子辐照引起的三结砷化镓电池性能衰减光谱响应曲线

Fig. 2 Spectral response degradations by electron radiation

在开始空间任务时,需要研究太阳电池辐射损伤规律,预测空间辐射环境对性能衰减的影响,以便开展太阳阵的设计工作。由于不同能量入射粒子对太阳电池光伏参数的衰减影响与位移损伤剂量成正相关关系,因此,位移损伤剂量可以评估太阳电池性能衰退情况。带电粒子在太阳电池材料中沉积的位移损伤剂量,其表达式为粒子通量与非电离能损的乘积。当带电粒子对电池性能参数的损伤系数与粒子的NIEL成线性关系时,则不同能量的曲线将会重合为同一条曲线;然而当损伤系数与粒子的NIEL成非线性关系时,不同能量的曲线将不会重合。

使用等效位移损伤剂量的概念,可使不同能量辐照试验曲线重合,其表达式为:

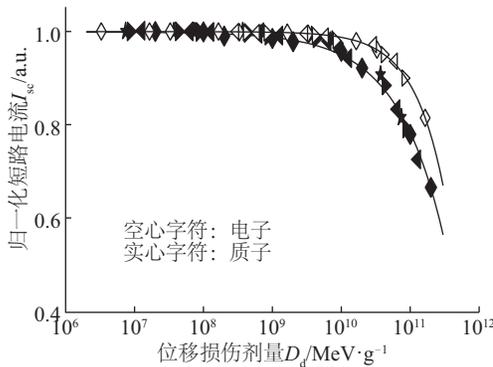
$$D_d = \Phi(E) \cdot S(E) \cdot \left[\frac{S(E)}{S(E_{ref})} \right]^{(n-1)} \quad (1)$$

式中, D_d ——等效位移损伤剂量, MeV/g; $\Phi(E)$ ——电子或质子通量, cm^{-2} ; $S(E)$ ——电子或质子在材料中的 NIEL 值, $\text{MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{g})$; $S(E_{ref})$ ——参考能量为 E_{ref} 的电子或质子 NIEL 值(通常为 1 MeV 电子或 10 MeV 质子对应的 NIEL 值), $\text{MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{g})$; n ——电子或质子损伤对 NIEL 的非线性关系。

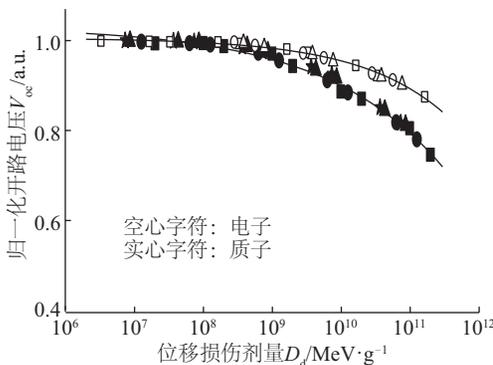
对于 n 不为 1 的任何值, D_d 代表的是给定粒子能量和参考能量的等效位移损伤剂量^[11-12]。在大部分情况下对于质子, n 值一般为 1; 对于电子, 辐射损伤系数对 NIEL 遵循着指数函数的变化规律, n 值一般在 1 和 2 之间变化^[4,13]。

如果将图 1 中的短路电流、开路电压和最大输出功率归一化数据重新处理, 横坐标换为式(1)计算出的等效 1 MeV 电子位移损伤剂量, 则图 1 中电子辐照损伤曲线将会重合成为一条曲线; 同理, 将横坐标换为式(1)计算出的质子位移损伤剂量, 则图 1 中质子辐照损伤曲线将会重合为一条曲线, 如图 3 所示。

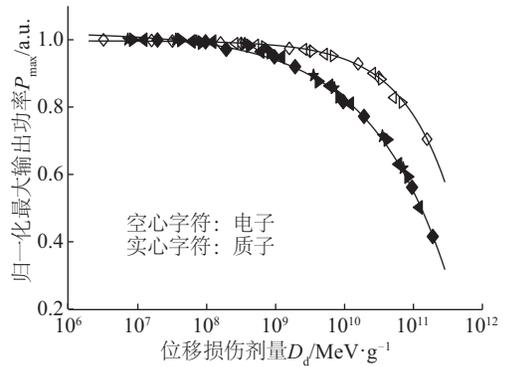
对于图 3 所示的三结砷化镓太阳电池的短路电流、开路电压和最大输出功率衰退曲线, 可利用半经验公式(2)进行拟合^[4]。



a. 归一化短路电流



b. 归一化开路电压



c. 归一化最大输出功率

图 3 三结砷化镓电池归一化短路电流、开路电压和最大输出功率随质子和等效 1 MeV 电子位移损伤剂量变化关系
Fig. 3 Normalized parameters I_{sc} , V_{oc} , and P_{max} as function of proton and effective 1 MeV electron D_d

$$N(E) = 1 - C \cdot \log \left(1 + \frac{D_d(E)}{D_s} \right) \quad (2)$$

式中, $N(E)$ ——归一化特征参数; C 、 D_s ——拟合参数, MeV/g。

图 3 的实线是曲线拟合获得的三结砷化镓太阳电池的特征曲线, 拟合结果如表 1 所示。获得的特征参数对于特定类型的太阳电池是确定的。原理上, 利用该特征曲线可以预测任何能量电子或质子对电池性能参数衰减的影响。

表 1 三结砷化镓太阳电池电子和质子辐照数据拟合参数

Table 1 Fitting values for GaAs solar cells

粒子类型	电学参数	n	$C/\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1}$	$D_s/\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1}$
电子	短路电流 I_{sc}	1.95	2.65	9.44×10^{11}
	开路电压 V_{oc}	1.80	0.07	2.45×10^9
	最大功率 P_{max}	1.62	0.35	2.69×10^{10}
质子	短路电流 I_{sc}	1.0	0.55	6.36×10^{10}
	开路电压 V_{oc}	1.0	0.11	1.23×10^9
	最大功率 P_{max}	1.0	0.31	3.83×10^9

注: n —电子或质子损伤对 NIEL 的非线性关系因子; C 、 D_s —拟合参数。

从图 3 可看出电子和质子辐照在相同的位移损伤剂量条件下, 三结砷化镓太阳电池短路电流、开路电压、输出功率等电学参数的衰退程度是不同的, 显然质子辐照造成的性能衰退更严重一些。对于空间电子和质子辐射都起主要作用的综合辐射环境, 需要获得电子和质子辐射损失等效关系。通过对比分析图 3 中的电子和质子损伤曲线, 可以将等效 1 MeV 电子辐照位移损伤

剂量转化为等效质子位移损伤剂量,其转换关系为:

$$D_{dp} = D_{xp} \left[\left(1 + \frac{D_{de}}{D_{xe}} \right)^{\frac{C_e}{C_p}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中, D_{dp} ——等效质子位移损伤剂量, MeV/g; D_{xp} ——表 1 给出的质子拟合参数, MeV/g; D_{de} ——等效 1 MeV 电子位移损伤剂量, MeV/g; D_{xe} ——表 1 给出的电子拟合参数, MeV/g; C_e ——表 1 给出的电子拟合参数; C_p ——表 1 给出的质子拟合参数。

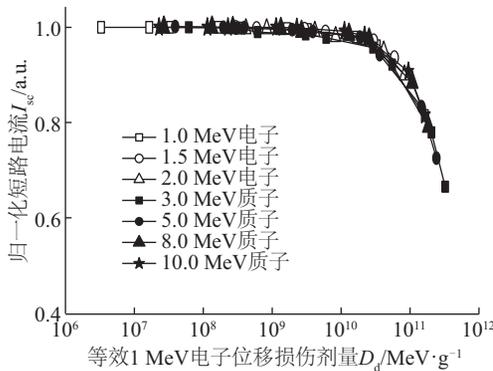
利用式(3)可建立三结砷化镓电池等效 1 MeV 电子位移损伤剂量与质子位移损伤剂量转换关系,转换公式列于表 2 中。用表 2 给出的等效转换关系可将等效 1 MeV 电子位移损伤剂量转换为质子位移损伤剂量,反之亦然。

表 2 太阳能电池质子与等效 1 MeV 电子位移损伤剂量转换关系

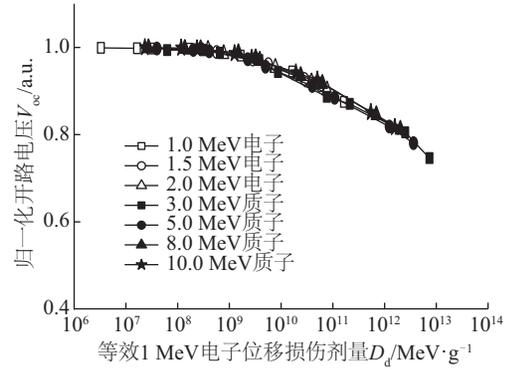
Table 2 Transfer relations between proton and effective 1 MeV electron D_d for solar cells

电学参数	等效位移损伤剂量转换关系
I_{sc}	$D_{dp} = 6.36 \times 10^{10} \left[\left(1 + \frac{D_{de}}{9.44 \times 10^{11}} \right)^{4.82} - 1 \right]$
V_{oc}	$D_{dp} = 1.23 \times 10^9 \left[\left(1 + \frac{D_{de}}{2.45 \times 10^9} \right)^{0.64} - 1 \right]$
P_{max}	$D_{dp} = 3.83 \times 10^9 \left[\left(1 + \frac{D_{de}}{2.60 \times 10^{10}} \right)^{1.13} - 1 \right]$

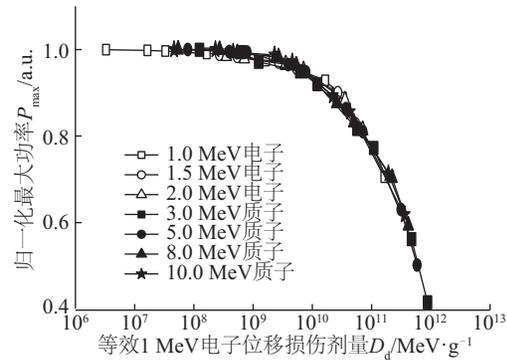
通过位移损伤剂量转换,图 3 中电子和质子位移损伤曲线重合为一条曲线,如图 4 所示。据此,建立综合辐射环境下三结砷化镓太阳能电池性能参数衰退模型,如表 3 所示。利用该模型可预测综合辐射环境对太阳能电池造成的辐射损伤。



a. 归一化短路电流



b. 归一化开路电压



c. 归一化最大输出功率

图 4 归一化短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 和最大输出功率 P_{max} 的质子和等效 1 MeV 电子位移损伤剂量等效关系曲线
Fig. 4 Effective relations of proton and effective 1 MeV electron D_d for I_{sc} , V_{oc} and P_{max}

表 3 三结砷化镓太阳能电池性能参数 (I_{sc} 、 V_{oc} 和 P_{max}) 衰退模型

Table 3 Degradation model for solar cells performance parameter I_{sc} , V_{oc} and P_{max}

剂量	衰退模型
等效 1 MeV 电子位移损伤剂量/ MeV·g ⁻¹	$I_{sc} = 1 - 2.65 \times \log \left(1 + \frac{D_{1MeV}}{9.44 \times 10^{11}} \right)$ $V_{oc} = 1 - 0.07 \times \log \left(1 + \frac{D_{1MeV}}{2.45 \times 10^9} \right)$ $P_{max} = 1 - 0.35 \times \log \left(1 + \frac{D_{1MeV}}{2.69 \times 10^{10}} \right)$
质子位移损伤剂量/ MeV·g ⁻¹	$I_{sc} = 1 - 0.55 \times \log \left(1 + \frac{D_d}{6.36 \times 10^{10}} \right)$ $V_{oc} = 1 - 0.11 \times \log \left(1 + \frac{D_d}{1.23 \times 10^9} \right)$ $P_{max} = 1 - 0.31 \times \log \left(1 + \frac{D_d}{3.83 \times 10^9} \right)$

注: D_{1MeV} ——等效 1MeV 电子位移损伤剂量; D_d ——位移损伤剂量 (表 4 同)。

利用三结砷化镓太阳电池模型,对中星 10 号的三结砷化镓太阳电池阵在轨寿命进行预测,比较预测结果与在轨实测结果(2011 年 6 月 11 日~2014 年 12 月 23 日)的一致性,考察模型的精确性。该卫星轨道为 GEO (35870 km, 0°) 轨道,发射时间为 2011 年 6 月。基于 AE8MAX、AP8MAX 的全向谱和 JPL91 模型,对该轨道的空间辐射环境进行分析,如图 5 所示。空间太阳电池正面通常粘接玻璃盖片作为辐射屏蔽防护层,而背面通常由电池衬底材料(例如 Ge 衬底材料)和太阳阵支撑面板提供辐射屏蔽。例如,75 μm 厚的石英玻璃盖片几乎可以完全阻挡能量小于~2.8 MeV 质子的辐射损伤;相比较而言,空间电子辐射损伤很难屏蔽,75 μm 厚的石英玻璃盖片只能屏蔽能量小于~200 keV 的电子辐射损伤。

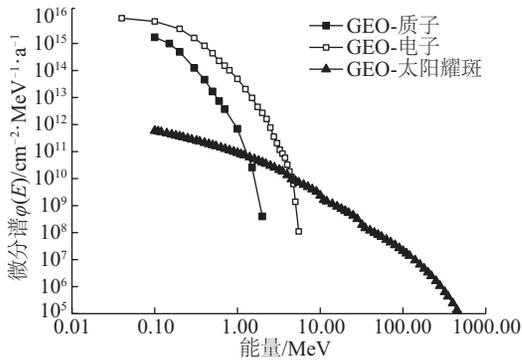


图 5 GEO 轨道辐射带电子、质子与太阳耀斑质子微分谱

Fig. 5 Differential spectra of earth trapped electron and proton, and solar flare proton for a GEO orbit

为研究石英玻璃盖片对空间电子、质子能谱衰减的影响,利用 Geant4 辐射输运工具箱计算了该卫星 90 μm 厚的玻璃盖片和没有盖片情况下,空间辐射粒子在三结砷化镓太阳电池中沉积的位移损伤剂量,结果如表 4 所示。

表 4 计算得到的 1 年期 GEO 辐射环境玻璃盖片屏蔽前后沉积在太阳电池的等效位移损伤剂量

Table 4 Calculated deposited in GaAs material before and behind silica coverglass after a one-year-mission flight

轨道类型	盖片厚度/ μm	电子等效 $D_e/\text{MeV}\cdot\text{g}^{-1}$	质子 $D_p/\text{MeV}\cdot\text{g}^{-1}$	太阳耀斑 $D_s/\text{MeV}\cdot\text{g}^{-1}$
GEO	0	2.18×10^9	—	2.04×10^{10}
	90	1.62×10^9	—	3.32×10^8

图 6 给出的是位移损伤剂量模型预测的中星 10 号三结砷化镓太阳电池最大输出功率辐射衰减预测数据(虚线)与在轨实测数据(实线)的比较结果。从图 6 可

看出该模型预测结果与在轨数据基本吻合,说明本文给出的三结砷化镓电池寿命预测模型能够较好地反映三结砷化镓太阳电池的在轨性能衰退情况。

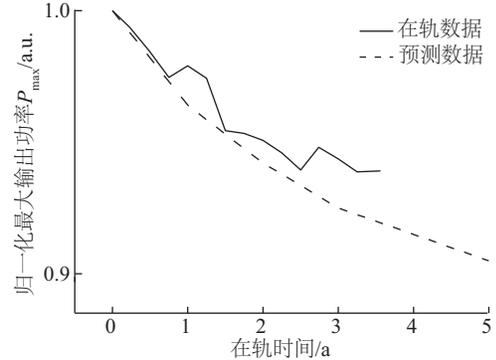


图 6 中星 10 号三结砷化镓太阳电池阵在轨数据与预测结果比较

Fig. 6 Comparison of on-orbit data and predicted results for triple-junction GaAs solar array of ZX-10 satellite

3 结 论

本文利用高能电子和质子对 MOCVD 生长的空间等级三结砷化镓太阳电池进行辐照试验,给出三结砷化镓太阳电池的短路电流、开路电压和最大输出功率的平均值,比较不同能量的电子和质子辐照对太阳电池辐射衰减影响,同时也为三结砷化镓太阳电池空间应用性能预测提供试验数据。利用位移损伤剂量法对辐照试验数据进行分析,建立了不同能量和通量的电子和质子对三结砷化镓电池最大输出功率、短路电流和开路电压辐射损伤模型。利用该模型,对 GEO 轨道的中星 10 号卫星三结砷化镓太阳电池阵的衰减情况进行预测。预测结果与在轨数据基本吻合,预测数值的最大不确定度在 3% 以内,说明利用位移损伤剂量法建立的三结砷化镓电池辐射衰退模型,可很好地预测三结砷化镓太阳电池在轨衰退情况。

[参考文献]

[1] ANSPAUGH B E. GaAs solar cell radiation handbook [M]. Padadena, CA, USA: JPL, 1996.
 [2] 铁剑锐, 许军, 肖志斌, 等. 大面积高效率空间用三结砷化镓太阳电池的研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 841-843.
 TIE J R, XU J, XIAO Z B, et al. Study of large area high efficiency triple junction GaAs solar cell [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(12): 841-843.
 [3] SATO S, BEERNINK K, OHSHIMA T. Degradation

- behavior of flexible a-Si/a-SiGe/a-SiGe triple-junction solar cells irradiated with protons [J]. IEEE journal of photovoltaics, 2013, 3(4): 1415-1422.
- [4] INGUIMBERT C, MESSENGER S. Equivalent displacement damage dose for on-orbit space applications [J]. IEEE transactions on nuclear science, 2012, 59(6): 3117-3125.
- [5] MESSENGER S R, TRAUTZ K, WALTERS R J, et al. Low energy proton implantation techniques for coverglass irradiation qualification [C]//2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, Hawaiian, USA, 2010.
- [6] MESSENGER S R, BURKE E A, WALTERS R J, et al. Effect of omnidirectional proton irradiation on shielded solar cells [J]. IEEE transactions on nuclear science, 2006, 53(6): 3771-3778.
- [7] JUN I, XAPSOS M I, MESSENGER S R, et al. Proton nonionizing energy loss (NIEL) for device applications [J]. IEEE transactions on nuclear science, 2003, 50(6): 1924-1928.
- [8] GAO X, YANG S S, FENG Z Z, et al. Evaluation and prediction of the degradation of space Si solar cells induced by low-earth-orbit radiation environment [J]. China physics C, 2012, 36(9): 1-5.
- [9] LUKA T, EITERNICK S, TUREK M. Rapid testing of external quantum efficiency using LED solar simulators [J]. Energy procedia, 2015, 77: 113-118.
- [10] 李欣, 林桂江, 刘冠洲, 等. 户外光谱下聚光多结太阳能电池电流匹配的优化 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(7): 1737-1743.
- LI X, LIN G J, LIU G Z, et al. Optimization of the current matching the concentrated multi-junction solar cells under the outdoor spectrum [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(7): 1737-1743.
- [11] SANTOS I, MARQUES L A, PELAZ L. Modeling of damage generation mechanisms in silicon at energies below the displacement threshold [J]. Physical review B, 2006, 74(17): 174115.
- [12] WARNER J H, MESSENGER S R, WALTERS R J. Correlation of electron radiation induced-damage in GaAs solar cells [J]. IEEE transactions on nuclear science, 2006, 53(4): 1988-1994.
- [13] INGUIMBERT C, ARNOLDA P, NUNS T, et al. Effective NIEL in silicon: Calculation using molecular dynamic results [J]. IEEE transactions on nuclear science, 2010, 57(4): 1915-1923.

STUDY ON DISPLACEMENT DAMAGE EFFECTS OF SPACE TRIPLE-JUNCTION GaAs SOLAR CELLS

Gao Xin¹, Yang Shengsheng², Feng Zhanzu¹, Cui Xinyu³, Wang Jun², Cao Zhou²

(1. Science and Technology on Material Performance Evaluating in Space Environment Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China; 2. Science and Technology on Vacuum & Cryogenics Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China; 3. Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300384, China)

Abstract: Space-graded triple-junction GaAs solar cells, produced by MOCVD, are evaluated through different energy electron and proton-irradiations to obtain the degradation data of the short circuit current, open circuit voltage and maximum power. The degradations relations at different electron or proton energies can be correlated with displacement damage dose. The performance prediction of the solar cell in space can be matched very well to the on-flight data from a high-voltage solar array of a China GEO satellite using the degradation relations. This study provides reference data for the design of these GaAs solar arrays in the typical space radiation environments to ensure the reliability of on-orbit spacecrafts.

Keywords: solar cell; GaAs; radiation effect; displacement damage dose; prediction