

150 keV 质子辐照对 GaAs 子电池性能的影响

颜媛媛¹, 方美华^{2,*}, 汤晓斌¹, 陈飞达¹

(1. 南京航空航天大学 核科学与工程系, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

摘要:低能质子辐射会使电池产生较大的非电离能量损失,导致少数载流子寿命降低从而破坏 GaInP/GaAs/Ge 电池的电能,其中尤以中间的 GaAs 子电池的衰减最严重。本文以卫星用主流 GaInP/GaAs/Ge 三结电池为研究对象,制备与三结电池中 GaAs 子电池相同尺寸结构和工艺的单结 GaAs 电池,以 150 keV 质子辐照后对其性能进行测试。测试结果表明,150 keV 质子辐照后电池的量子效率衰减,且基区衰减最严重。光致发光测试结果显示,在 3×10^{10} 、 1×10^{11} 、 5×10^{11} cm^{-2} 辐照剂量下,非辐射复合少数载流子寿命分别为 2.22、0.67、0.13 ns。基于上述结果,利用多物理场仿真软件 COMSOL 建立了 GaAs 的物理模型,对 GaAs 子电池衰减进行仿真,将实验结果与模拟结果进行对比,两者电学参数的最大相对偏差为 7%。仿真结果表明:中国空间站中电池的辐射衰减主要源于内辐射带中的质子,空间站轨道太阳能电池运行 5 a,在太阳活动极大时,最大功率衰减约为 7.6%,太阳活动极小时,最大功率衰减约为 13.7%。

关键词:GaAs 太阳能电池;辐照损伤;COMSOL;少数载流子寿命

中图分类号:TL99

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2019)11-2309-08

doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0839

Effect of 150 keV Proton Irradiation on Performance of GaAs Solar Cell

YAN Yuanyuan¹, FANG Meihua^{2,*}, TANG Xiaobin¹, CHEN Feida¹

(1. Department of Nuclear Science & Engineering, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The low energy proton irradiation will cause a large loss of non-ionizing energy on the solar cells and lead to a decrease of minority carrier lifetime, thus destroying the electrical properties of the GaInP/GaAs/Ge. In particular, the degradation of the GaAs sub-cell is the most serious. In this paper, a single-junction GaAs cell with the same structure as the GaAs sub-cell in the triple-junction solar cells was prepared. The properties of the single-junction GaAs cell irradiated by 150 keV proton were tested.

收稿日期:2018-11-19;修回日期:2019-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11405085);上海航天科技创新基金资助项目(SAST2016109)

作者简介:颜媛媛(1993—),女,江苏淮安人,硕士研究生,材料工程专业

*通信作者:方美华,E-mail:fmh_medphys@nuaa.edu.cn

网络出版时间:2019-05-09;网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190507.1420.010.html

The results show that after 150 keV proton irradiation, the degradation of the base region is the most serious. Based on the photoluminescence results, the non-radiative minority carrier lifetimes are 2.22, 0.67 and 0.13 ns at the irradiation fluence of 3×10^{10} , 1×10^{11} and $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ respectively. Based on the above results, the physical model of GaAs was established by using multi-physical field software COMSOL, and the degradation of GaAs sub-cell was simulated. The experimental results were compared with the simulation results, and the maximum relative deviation between them is 7%. The simulation results show that the radiation damage of GaAs solar cells on the Chinese Space Station mainly is induced by earth's trapped proton and the degradation of maximum power after 5 years is about 7.6% in solar maximum and about 13.7% in solar minimum.

Key words: GaAs solar cell; radiation damage; COMSOL; minority carrier lifetime

III-V族叠层太阳能电池,如GaInP/GaAs/Ge三结电池,由于其转换效率高、温度系数低等优点被普遍应用于航天器和卫星的主要能源系统^[1]。然而当其暴露于空间辐射环境下时,电学性能会发生衰减^[2]。对卫星用GaInP/GaAs/Ge三结电池的辐照实验^[3-4]证明,作为三结电池的中间层GaAs子电池,其受到的辐照损伤较其他子电池严重,中间层GaAs子电池一旦受到辐照损伤,光伏参数明显降低。因此,为保证GaInP/GaAs/Ge三结电池在空间服役的可靠性,有必要对其中间层GaAs子电池进行辐照损伤研究。

GaAs太阳能电池作为卫星用主流电池,关于其电性能辐射衰减的研究很多,主要是利用地面加速器提供的离子对太阳能电池进行辐照,得到其性能退化随离子能量、注量的变化情况。对GaAs电池辐射衰减评估主要采用等效注量法和位移损伤剂量法,分别将辐照损伤与辐照注量和位移损伤剂量相关联,建立的经验模型具有工程应用意义^[5]。而根据辐照导致电池性能衰减的原理,辐照会使电池中产生深能级缺陷进而导致少数载流子寿命降低是电池输出衰减的主要原因^[4],因此,有必要对辐照后电池中的少数载流子寿命进行分析,并对少数载流子寿命与电池电学性能的关系进行研究。目前对GaAs电池少数载流子寿命测试主要采用时间分辨光致发光测试手段,该测试对样品的尺寸、结构要求较高,且对测试设备精度要求较高^[6-7]。鉴于对少数载流子寿命实验测试困难,本文提出一种有限元模拟的

方法来分析GaInP/GaAs/Ge三结电池辐照后中间层GaAs子电池中的少数载流子寿命,建立少数载流子寿命与GaAs输出性能的衰减模型。在此基础上,以中国空间站卫星为研究对象,研究其所面临的辐射环境,以及辐射环境对电池输出衰减的影响。

1 实验

1.1 实验过程

为研究卫星用三结太阳能电池GaInP/GaAs/Ge中间层GaAs子电池在辐照条件下的性能衰减,制备与中间电池结构尺寸和制备工艺条件一致的单结GaAs电池进行辐照实验。三结和单结电池均由上海空间电源研究所制备,制备工艺为金属有机化学气相沉积(MOCVD),具体结构尺寸如图1所示。

以100 nm高掺杂的缓冲层作为后续基区以及发射区的起始层,在缓冲层上先外延掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为3 μm 的基区,再生长掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为100 nm的发射区。电池样品的面积为1 cm \times 1 cm,电池整体厚度为373 μm 。

采用蒙特卡罗软件SRIM对质子在电池中的射程进行模拟,150 keV质子的射程在电池基区。150 keV质子辐照在哈尔滨工业大学空间环境材料行为与评价技术国家级重点实验室的正离子辐照模拟系统上进行,注量为 $3 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$,注量率为 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在室温、真空度 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 条件下进行。

对辐照前后的样品进行电性能测试、量子

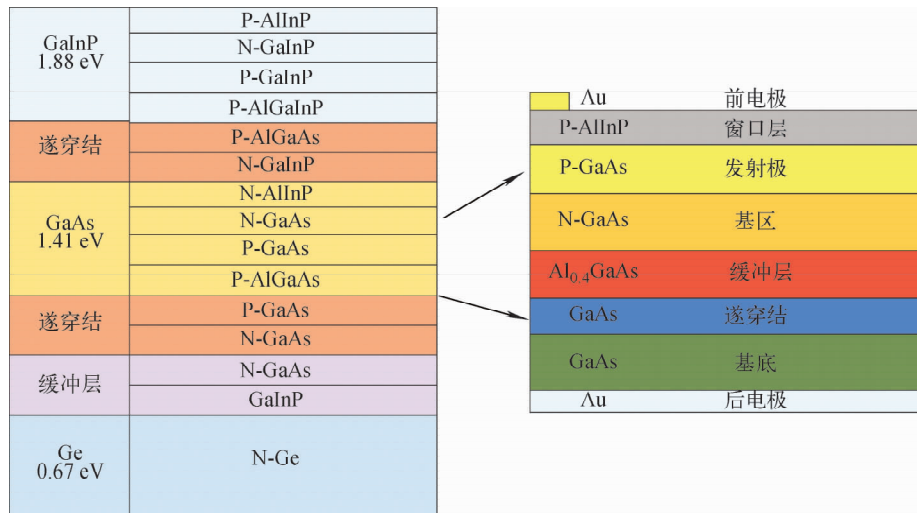


图 1 GaInP/GaAs/Ge 三结电池结构
Fig. 1 Structure of GaInP/GaAs/Ge

效率测试和光致发光测试。用太阳光模拟器模拟 AM0(大气质量 0, 能量密度 135 mW/cm²), 在室温下测试 GaAs 太阳能电池在该条件下辐照前后的 $I-V$ (I 为电流, V 为电压) 特性, 测量的电池样品性能参数包括开路电压 (V_{oc})、短路电流 (I_{sc})、最大输出功率 (P_{max}), 测试设备为 Keithley 2636 数字源表。利用 LabRam HR 800 光致发光测试仪测试 GaAs 电池辐照前后的光致发光 (PL) 特性曲线。

1.2 COMSOL 物理建模

采用多物理场分析软件 COMSOL Multiphysics 对太阳能电池进行模拟^[8]。考虑到太阳能电池光电转换过程涉及半导体和光学两个方面的物理过程, 模型将射线光学模块与半导体模块相结合, 来阐明 GaAs 太阳能电池的工作情况。

1) 物理模型基本方程

模拟过程中使用载流子扩散和迁移方程。为研究低能质子辐照下太阳能电池产生的缺陷及其对电池性能的影响, 采用 Shockley-Read-Hall 复合模型模拟缺陷的产生过程。半导体模块中采用泊松方程 (式 (1))、电子输运方程 (式 (2)) 和空穴输运方程 (式 (3)) 结合进行模拟计算。

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \cdot \nabla V) = q(p - n + N) \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot (qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla V) = -qR_{SRH} \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot (qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla V) = qR_{SRH} \quad (3)$$

其中: V 为空间电势分布; n 和 p 分别为电子和空穴浓度; ϵ_0 为介电常数; N 为掺杂浓度; D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率; R_{SRH} 为辐射复合率。

射线光学模块用于计算太阳光的平均照度和光谱辐照度。光谱辐照度用于定义载流子生成速率 G :

$$G = \int \alpha(\lambda)(1 - R(\lambda))\varphi(\lambda)\exp(-i\alpha(\lambda))d\lambda \quad (4)$$

其中: $\alpha(\lambda)$ 为电池材料对光的吸收系数; $R(\lambda)$ 为电池材料对光的反射系数; $\varphi(\lambda)$ 为光的产生速率。本文假设电池的输出特性与光谱辐照度 H_0 成正比。依据电池 AM0 光谱的光强, 本文参考辐照度取 $H_0 = 135 \text{ mW/cm}^2$ 。

2) 物理模型相关参数

对电池基区采用 N 型解析掺杂模型, 电池前表面为 P 型几何掺杂, 结深为 $0.5 \mu\text{m}$ 。对于电池中产生的陷阱复合采用 Shockley-Read-Hall 复合模型进行描述。模拟过程中使用的材料参数列于表 1。

2 结果与讨论

2.1 量子效率分析

量子效率是用于评估太阳能电池辐照后损伤的有效分析方法。电池光谱的变化就是电池性能的改变。质子辐照后电池量子效率与 SRIM 模拟的质子在电池中的射程与损伤分布

示于图2。其中纵坐标为量子效率的强度,强

表 1 模拟过程中使用的材料参数

Table 1 Material parameter used in simulation process

参数	数值
能带 E_g, eV	1.43
GaAs 相对介电常数 ϵ_r	13.1
N 区掺杂浓度, cm^{-3}	1×10^{17}
P 区掺杂浓度, cm^{-3}	1×10^{18}
GaAs 电子迁移率 $\mu_n, cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	8 800
GaAs 空穴迁移率 $\mu_p, cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	400
电子热运动速率 $v_{thn}, cm \cdot s^{-1}$	4.4×10^7
空穴热运动速率 $v_{thp}, cm \cdot s^{-1}$	1.8×10^7

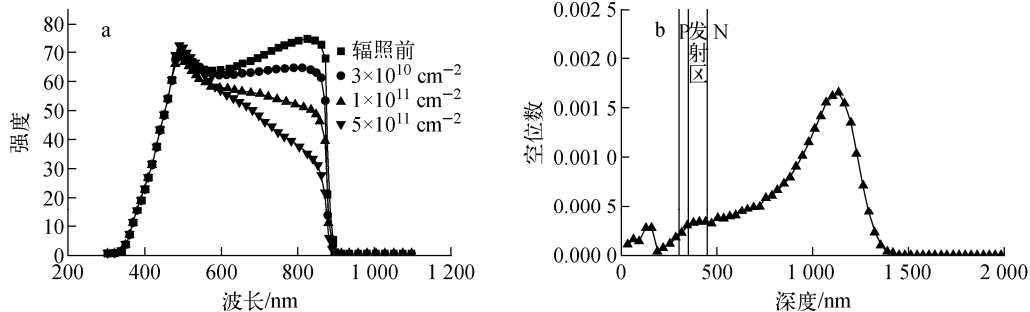


图 2 电池的量子效率曲线(a)和质子在电池中的射程与损伤分布的 SRIM 模拟(b)

Fig. 2 Quantum efficiency curve of GaAs (a) and SRIM simulation of range and damage distribution of proton in GaAs (b)

由 SRIM 模拟(图 2b)可知,150 keV 能量质子射程在 GaAs 电池的基区,说明 150 keV 质子辐照下,基区的损伤较发射极和空间电荷区的大。而由图 2 还可知,基区的空位数高于发射极。因此量子效率曲线的变化可能与辐照引起的缺陷有关,辐照缺陷使光产生的载流子的扩散长度减小,从而影响载流子的收集效率。根据辐照后电池中少数载流子寿命表达式^[9](式(5))可知,空位等缺陷浓度越高,电池少数载流子寿命越低,少数载流子寿命降低是电池电学性能减低的主要原因。

$$1/\tau = 1/\tau_0 + N\sigma v \quad (5)$$

其中: τ 为辐照后少数载流子的寿命; τ_0 为辐照前少数载流子的寿命; N 为辐照导致的电池中的缺陷浓度; σ 为辐照后少数载流子的俘获截

度越大,表明缺陷越少,电池性能越好。

图 2a 表明,150 keV 低能质子辐照后,量子效率曲线在短波部分衰减较小,在长波段衰减较大;量子效率在 500~900 nm 波长范围内明显下降,衰减峰出现在 860 nm(约 1.41 eV)。对于波长较短的光波,光子几乎全部被电池前面的 P 区吸收,波长在 400~800 nm 之间时,入射光子通过窗口层到达 P-GaAs 层后,绝大部分在该层被吸收而产生光生载流子,这些载流子能否扩散到达电池结区,且被 PN 结静电场分离,越过 PN 结而产生光生电流,是决定电池效率的最主要因素。波长超过 800 nm 后,由于光子在 GaAs 中有较长的穿透深度,因此电池的表面复合率对电池性能起主要影响作用。

面; v 为载流子热运动速率。

2.2 光致发光测试与少数载流子寿命

光致发光(PL)通过用波长较短的激光激发半导体材料产生荧光,通过对辐照前后的 GaAs 太阳能电池进行 PL 强度测试,分析 GaAs 电池的光学特性。质子辐照后 GaAs 太阳能电池的 PL 光谱如图 3 所示。

从图 3 可看出,辐照前的 PL 光谱在波长 870 nm 处有 1 个很强的锐峰。辐照前电池的特征峰强度达 18 000,辐照后降为 2 000,说明 150 keV 质子辐照对 GaAs 太阳能电池的光学性能具有破坏性影响,GaAs 的晶体点阵受到严重破坏,产生了大量辐照缺陷。辐照后 GaAs 材料的 PL 强度随低能质子辐照注量的增加而显著降低。

辐照后电池的 PL 相对强度(辐照后 PL 强度与辐照前 PL 强度的比)显著降低,这也是由于少数载流子变化造成的,PL 相对强度 η 表达式^[10]如下:

$$\eta = (1 + \tau_r/\tau_{nr})^{-1} \quad (6)$$

其中: τ_r 为辐射复合少数载流子寿命; τ_{nr} 为非辐射复合少数载流子寿命。 τ_r 可表示为:

$$\tau_r = 1/BN \quad (7)$$

其中: N 为掺杂浓度; B 为辐射复合系数,由式(10)表示:

$$B \approx \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{h}{m_c}\right)^3 \frac{n_g^2 c \alpha_g}{(m_c m_v)^{3/2}} \cdot \left(\frac{E_g(0)}{kT} - \frac{S_g T_E/T}{e^{T_E/T} - 1} + 1\right)^2 \approx B_0 \left(\left(\frac{T_b}{T}\right)^2 - 1\right) \quad (8)$$

其中: c 为光速; $E_g(0)$ 为能带; n_g 和 α_g 分别为折射率和吸收系数; m_c 和 m_v 分别为电子和空穴有效质量与电子质量之比; S_g 为无量纲耦合常数; T_E 为爱因斯坦温度; T 为温度; T_b 为辐射系数模型温度; h 为普朗克常数。

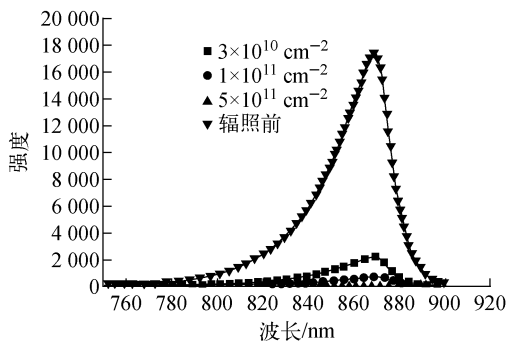


图3 质子辐照后 GaAs 太阳能电池的 PL 光谱
Fig. 3 Photoluminescence spectrum of GaAs solar cell irradiated by proton

结合式(8)可得出,在室温 ($T = 300$ K) 下,辐射复合系数 $B = 0.65 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,从而计算出质子辐照前 GaAs 电池中辐射复合载流子寿命 τ_r 为 15.4 ns。对于单结 GaAs 电池,辐照前电池中的非辐射复合载流子寿命为 600~1 000 ns。因此结合有效载流子寿命公式(式(9))可知,辐照前,有效载流子寿命 τ_{eff} 由辐射复合少数载流子寿命决定。

$$1/\tau_{\text{eff}} = 1/\tau_r + 1/\tau_{nr} \quad (9)$$

$$\tau_{nr} = 1/k\sigma v\varphi \quad (10)$$

其中: σ 为少数载流子俘获截面; v 为少数载流子的热运动速率; k 为非辐射复合中心的引入率。

根据式(6)~(10),PL 相对强度 η 可用下式表示:

$$\eta = (1 + \tau_r/\tau_{nr})^{-1} = (1 + \tau_r k\sigma v\varphi)^{-1} \quad (11)$$

由式(11)可知,PL 相对强度可表示为归一化的 PL 强度与质子辐射注量的拟合函数,因此依据 PL 相对强度与式(11),得到 PL 相对强度与辐照注量的关系曲线,如图 4 所示。根据图 4 可得出参数 $k\sigma v$ 为 $0.015 \text{ cm}^2/\text{s}$,由式(11)可计算得到 τ_{nr} ,再由式(9)即可计算得到 τ_{eff} ,计算结果列于表 2。

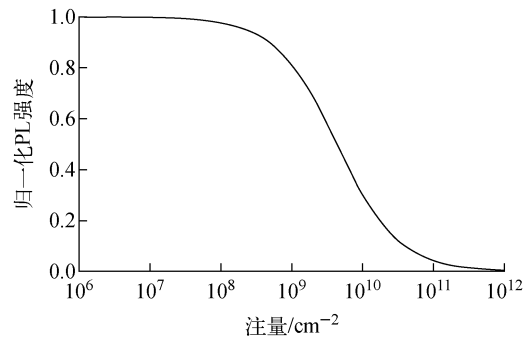


图4 GaAs 太阳能电池的归一化 PL 强度与辐照注量的关系

Fig. 4 Relationship between normalized PL intensity of GaAs solar cell and irradiation fluence

表2 150 keV 质子辐照后 GaAs 中非辐射复合载流子寿命

Table 2 Non-radiative carrier lifetime of GaAs after 150 keV proton irradiation

注量/ cm^{-2}	τ_{nr}/ns	$\tau_{\text{eff}}/\text{ns}$
3×10^{10}	2.22	1.94
1×10^{11}	0.67	0.64
5×10^{11}	0.13	0.13

从表 2 可看出,质子辐照后电池中的非辐射复合少数载流子寿命随辐射注量的增加而急剧降低,因此质子辐照后,电池中的有效少数载流子寿命由非辐射复合少数载流子寿命决定。由此可知,辐照前,GaAs 的少数载流子的复合以辐射复合为主,而辐照到一定程度后,电池中少数载流子的复合方式以非辐

射复合为主, 电池辐照后电性能降低主要是由于电池中非辐射复合少数载流子寿命的降低导致的。

2.3 GaAs 电池辐照后电学性能分析

GaAs 电池辐照前后的 I - V 曲线如图 5a 所

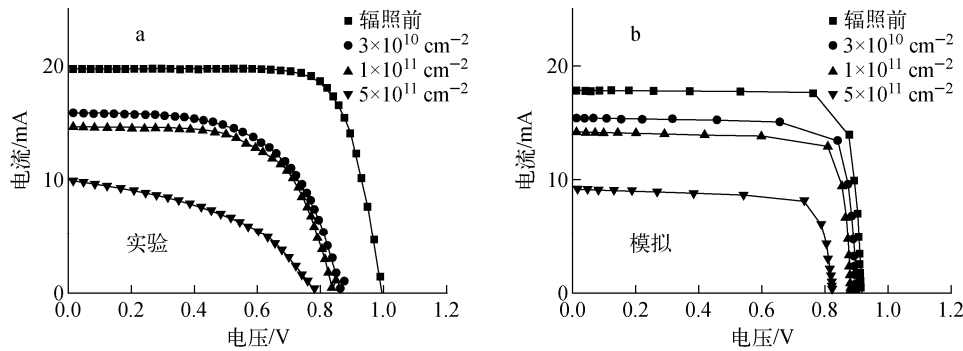


图 5 GaAs 电池辐照前后的 I - V 曲线

Fig. 5 I - V curve of GaAs before and after irradiation

将 PL 测试得到的 τ_{nr} 代入利用有限元软件建立的 GaAs 电池的物理模型, 对 GaAs 电池在 150 keV 质子不同辐照注量下的衰减曲线进行模拟, 结果如图 5b 所示, 关键电学参数短路电流、开路电压和填充因子 (FF) 模拟值与实验值的对比示于图 6。

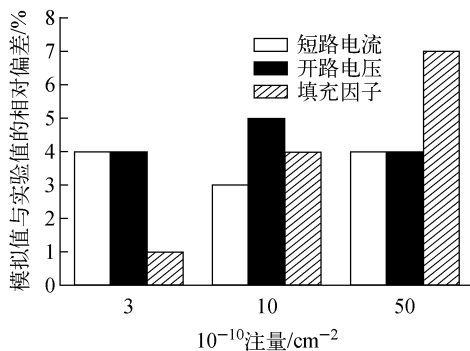


图 6 GaAs 电池辐照后电池输出性能参数模拟值和实验值的比较

Fig. 6 Comparison of simulated and experimental output performance parameter of GaAs cell after irradiation

由图 6 可见, 由本文建立的 GaAs 电池物理模型所得的模拟结果与实验测试结果的最大相对偏差为 7%, 其中 I_{sc} 和 V_{oc} 的较小, FF 的较大, 主要原因是 COMSOL 模拟过程中所建立

的物理模型与实际电池相比较为理想化。由图 5a 可知, 随着辐照注量的增加, 电池的短路电流 I_{sc} 和开路电压 V_{oc} 都发生了衰减, 辐照注量小于 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, I_{sc} 的衰减较少, 注量达到 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, I_{sc} 衰减至原电池的约 50%, 电池的损伤较严重。

的物理模型与实际电池相比较为理想化。

根据文献[11], 式(10)中非辐射复合中心的引入率 k 可表示为:

$$k = \beta E_{niel} \quad (12)$$

其中: β 为系数; E_{niel} 为非电离能量损失。对于 150 keV 能量的质子, $E_{niel,p}$ 为 $0.24 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$, 则可得 β 为 $0.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^{-1}$, 则由式(10)、(11)可得不同非电离能量损失条件下的 τ_{nr} 。

运行于地球轨道的航天器将面临不同的辐射环境, 以高度 400 km、倾角 51.6° 的空间站轨道^[12]为例, 主要辐射来源于地磁场捕获辐射带的南大西洋异常区, 所面临的辐射由电子和质子组成。按照空间辐射场的数据, 对太阳活动极大与极小时轨道质子和电子的非电离能损通量进行计算, 结果示于图 7。

由图 7 可看出, 质子的非电离能量损失较电子高约 5 个数量级, 因此电池的辐射损伤衰减主要来源于质子辐射。

服役于空间的电池会采用玻璃盖片、增透膜、硅胶等材料对辐射离子进行屏蔽, 本文采用电池玻璃盖片的厚度 (0.12 mm)^[12] 对空间质子非电离能量损失微分通量进行评估, 结果示于图 8。对图 8 能谱进行积分可得, 空间站太阳能电池在太阳极大和极小时获得的非电离能量损失分别为 8.3 、 $20.3 \text{ MeV}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 。

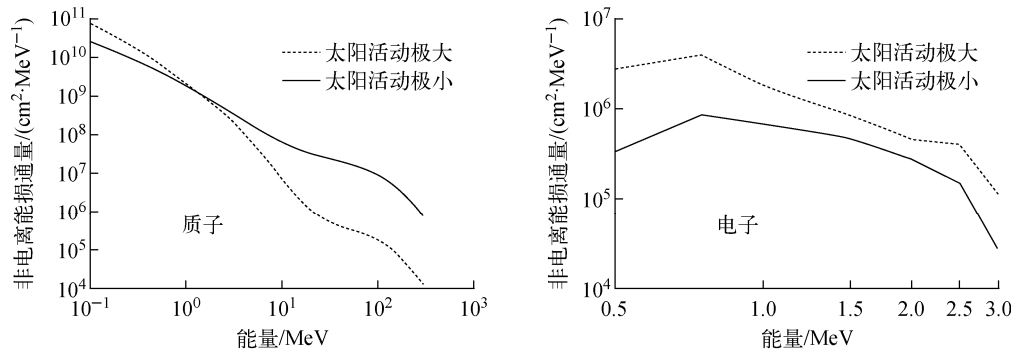


图 7 空间轨道非电离能损微分谱

Fig. 7 Proton non-ionization energy loss differential spectrum of space orbit

根据所建立的 COMSOL 物理模型,可计算获得不同运行时间后 GaAs 电池的衰减。表 3 为空间站太阳能电池运行 5 a 后其电学性能参数衰减的百分比。从表 3 可看出,空间站运行 5 a 后,太阳活动极大时,最大功率衰减约 7.6%,太阳活动极小时,最大功率衰减约 13.7%,该数值与文献[13]中位于低地球轨道(高度 500 km)电池 5 a 的衰减量 9.6%较为符合。因此对于空间轨道中的太阳能电池,可采用 PL 结合有限元模拟的方法,对电池衰减进行预估。

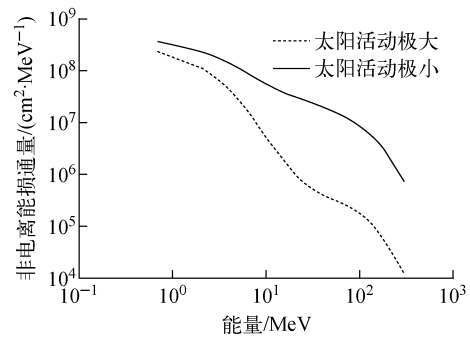


图 8 穿过玻璃盖片后质子非电离能损微分谱

Fig. 8 Proton non-ionizing energy loss differential spectrum after passing through cover glass

表 3 GaAs 电池在空间站轨道服役 5 a 电性能衰减值

Table 3 Electrical performance degradation value of GaAs cell in space station orbital service for 5 a

太阳活动	τ_{nr}/s	I_{sc}/mA	V_{oc}/V	P_{max}/mW	5 a 衰减百分比/%		
					I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
极小	5×10^{-11}	18.7	0.97	12.08	6.5	3.0	13.7
极大	1×10^{-10}	19.52	0.989	12.93	2.4	1.1	7.6

3 结论

通过实验和 COMSOL 有限元模拟对 150 keV 质子辐照对 GaAs 电池性能的影响进行了研究。量子效率测试表明,低能质子辐照后, GaAs 电池量子效率在短波段衰减较少,长波段衰减较为严重,归因于电池辐照后缺陷的产生导致少数载流子寿命降低。PL 测试也表明,质子辐照后电池的 PL 光谱的特征峰强度降低,主要原因是辐照后电池中产生了缺陷和复合中心,且辐照后电池中的非辐射复合少数载流子寿命显著降低,这也是 GaAs 电池辐照后性能衰减的主要原因。结合 PL 测试结果与

COMSOL 有限元模拟,建立了 GaAs 子电池模型,将模拟得到的电池输出与实验测试的 I-V 结果进行对比,验证了模型的准确性,该模型可用于在轨服役三结电池中最易损伤的 GaAs 子电池性能的预测与其少数载流子寿命的评估。

参考文献:

- [1] BOISVERT J, LAW D, KING R, et al. High efficiency inverted metamorphic (IMM) solar cells [C]//Photovoltaic Specialists Conference. US: IEEE, 2014: 2 790-2 792.
- [2] 王荣,张新辉,郭增良,等. 空间实用 GaAs/Ge 大

- 阳电池高能质子辐射效应研究[J]. 核技术, 2003, 26(6): 432-435.
- WANG Rong, ZHANG Xinhui, GUO Zengliang, et al. High-energy proton irradiation effects on GaAs/Ge solar cells for space use[J]. Nuclear Techniques, 2003, 26(6): 432-435 (in Chinese).
- [3] 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, 28(10): 1 599-1 602.
- WANG Rong, LIU Yunhong, SUN Xufang, et al. Low-energy proton irradiation effects of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells for space use[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(10): 1 599-1 602 (in Chinese).
- [4] OCHOA M, YACCUZZI E, ESPINET-GONZÁLEZ 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.
- [5] 王荣, 刘运宏, 鲁明, 等. GaAs/Ge 太阳电池电子辐射效应的移位损伤剂量分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(5): 520-522.
- WANG Rong, LIU Yunhong, LU Ming, et al. Using displacement damage dose to analyze electron irradiation effects on GaAs/Ge solar cells[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(5): 520-522 (in Chinese).
- [6] ZHU L, YOSHITA M, CHEN S, et al. Characterizations of radiation damage in multijunction solar cells focused on subcell internal luminescence quantum yields via absolute electroluminescence measurements[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(3): 777-782.
- [7] SUMMERS G P, WALTERS R J, XAPSOS M A, et al. A new approach to damage prediction for solar cells exposed to different radiations[C]// 1994 IEEE First World Conference. US: IEEE, 1994.
- [8] MAZOUZ H, LOGERAIS P O, BELGHACHI A, et al. Effect of electron irradiation fluence on the output parameters of GaAs solar cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(39): 13 857-13 865.
- [9] MEFTAH A, SENGOUGA N, MEFTAH A. Prediction of the performance degradation of GaAs solar cells by electron irradiation[J]. Revue des Energies Renouvelables, 2008, 11(4): 603-610.
- [10] ZAZOUI M, BOURGOIN J C. Space degradation of multijunction solar cells: An electroluminescence study[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(23): 4 455-4 457.
- [11] MAKHAM S, ZAZOUI M, SUN G C, et al. Prediction of proton-induced degradation of GaAs space solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(10): 1 513-1 518.
- [12] ORABY O A, EL-KORD M F, HANAA T, et al. UASat solar array design and performance characteristics[J]. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 2014, 3(2): 167-172.
- [13] GAO X, YANG S, FENG Z. Radiation effects of space solar cells[J]. High-Efficiency Solar Cells, 2014, 190: 597-622.