

# 不同能量质子辐照诱发子电池 GaAs 退化模拟研究

李俊炜<sup>1</sup>, 石成英<sup>1</sup>, 王祖军<sup>2\*</sup>, 薛院院<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安高科技研究所, 陕西 西安 710025;

<sup>2</sup>西北核技术研究院, 陕西 西安 710024

**摘要** 为了研究空间辐照诱发的子电池 GaAs 相关参数的退化行为, 以三结太阳能电池的子电池 GaAs 为研究对象, 开展了不同辐照条件下的质子辐照模拟研究, 建立了子电池 GaAs 结构模型, 得到了不同辐照能量和注量下短路电流、开路电压、转化因子、最大功率的退化结果。利用现有实验数据, 验证了不同能量质子辐照诱发的子电池 GaAs 的归一化最大功率随质子注量的退化。结合子电池 GaAs 在不同辐照条件下的最大功率退化结果, 得到了归一化最大功率随位移损伤剂量的退化方程。研究表明: 质子辐照诱发的辐照缺陷是导致子电池退化的直接原因, 子电池 GaAs 的短路电流、开路电压、转化因子和最大功率随质子注量的增加而逐渐退化。当质子注量大于  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  时, 子电池 GaAs 的归一化电学参数的退化幅度与质子注量的对数值近似成正比, 电学参数的退化随质子辐照能量的减小而逐渐增加。质子辐照诱发的子电池 GaAs 的外量子效率在长波长范围内的退化情况比其在短波长范围内的退化情况更严重。

**关键词** 材料; GaAs 子电池; 不同能量质子辐照; 参数退化; 数值模拟; 外量子效率

中图分类号 TM914.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0516003

## Theoretical Simulation on Degradation of GaAs Sub-Cells Induced by Proton Irradiation with Different Energies

Li Junwei<sup>1</sup>, Shi Chengying<sup>1</sup>, Wang Zujun<sup>2\*</sup>, Xue Yuanyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Xi'an Research Institute of High-Technology, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

<sup>2</sup>Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** In order to study the degradation behavior of the related parameters of GaAs sub-cells induced by space irradiation, the proton irradiation simulation was carried out under different irradiation conditions, taking GaAs sub-cells of three-junction solar cell as the research object. The structure model of GaAs sub-cells was established and the degradation results of short-circuit current, open-circuit voltage, fill factor and maximum power induced by proton irradiation with different energies and fluences were obtained. The normalized maximum power degradation of GaAs sub-cells induced by proton irradiation versus fluence was verified by the existing experimental data. According to the maximum power degradation results of GaAs sub-cells under different irradiation conditions, the degradation equation of normalized maximum power versus displacement damage dose was obtained. The research results indicate that the irradiation defects induced by proton irradiation directly lead to the degradation of sub-cells, and the short-circuit current, open-circuit voltage, fill factor and maximum power of GaAs sub-cells degrade with the increase of proton fluence. When the proton fluence is more than  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , the degradation degree of the normalized electrical parameters of GaAs sub-cells is directly proportional to the log value of proton fluence.

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-10-21; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 国家自然科学基金 (11875223, 11805155)、国家重点实验室基金 (SKLIPR1803)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA15015000)、抗辐照应用技术创新基金 (KFZC2018040201)

\* E-mail: wangzujun@nint.ac.cn

Meanwhile, the degradation of the electrical parameters increases gradually with the decrease of proton irradiation energy. The degradation of the external quantum efficiency of GaAs sub-cells induced by proton irradiation in the long-wavelength range is more serious than that in the short-wavelength range.

**Key words** materials; GaAs sub-cell; proton irradiation with different energies; parameter degradation; numerical simulation; external quantum efficiency

**OCIS codes** 160.3380; 350.6050; 350.4990; 350.5610

## 1 引言

三结太阳电池由 GaInP、GaAs 和 Ge 三种子电池组成,其中每个子电池材料的带隙宽度均不相同,可吸收的光子波长范围不同,因此三结太阳电池的吸收光谱范围较大<sup>[1-5]</sup>。然而,航天器上的三结太阳电池在空间运行时会受到空间粒子的辐照作用<sup>[6]</sup>,其中空间高能质子辐照会导致太阳电池相关性能发生退化。随着运行时间的增加,太阳电池甚至会失效。已有研究表明,相比于子电池 GaInP 和子电池 Ge,子电池 GaAs 的抗质子辐照性能较差<sup>[1]</sup>。在三结太阳电池的抗质子辐照研究中,有必要先对质子辐照诱发子电池 GaAs 相关参数退化的机理进行分析。

研究者利用地面质子源开展了子电池 GaAs 的相关辐照实验研究<sup>[1,6]</sup>,模拟了空间质子诱发的子电池 GaAs 相关参数的退化情况。首先将三结太阳电池固定在特定的靶面上,利用地面具有固定能量的质子加速器对子电池 GaAs 开展了不同质子注量下的质子束辐照实验,得到了太阳电池相关特征参数随质子注量的退化规律。但质子加速器发射的质子能量较为固定,目前开展的相关实验只能分析特定能量和注量下质子诱发的太阳电池的退化情况,不能分析完整能谱下 GaAs 太阳电池相关参数的退化情况。因为太阳电池材料的厚度、掺杂浓度等存在较大的差异性,不同结构太阳电池在相同辐照条件下的退化情况存在较大差异,所以地面质子源下太阳电池的辐照实验具有较大的局限性。理论模拟作为研究太阳电池空间质子辐照效应的一种重要方法<sup>[7-9]</sup>,具有准确性高、耗时短、数据量大等优点,可以分析完整能谱下质子辐照诱发的参数退化情况,从而得到相关参数的退化结果<sup>[10]</sup>。付帅等<sup>[10]</sup>采用 wxAMPS 模拟软件,利用电子辐照诱发的子电池 GaAs 的能级缺陷,模拟了 1 MeV 电子诱发的子电池 GaAs 的参数退化情况,并利用实验结果验证了模拟结果的准确性。Yan 等<sup>[1]</sup>采用 SILVACO 器件模拟软件,利用低能质子辐照诱发的子电池 GaAs 的能级缺陷,开展了 150 keV 低能质子诱发子电池

相关参数退化的模拟研究。然而,目前关于完整能谱下质子辐照诱发子电池 GaAs 退化的模拟研究鲜有报道,因此亟需研究不同能量质子辐照诱发的子电池 GaAs 相关参数退化情况,深入分析不同辐照条件下相关参数的退化机理。

为了深入研究不同能量和注量条件下质子诱发的子电池 GaAs 相关参数的退化规律,需要分析子电池 GaAs 的质子辐照损伤机理。本文利用 wxAMPS 太阳电池模拟软件,以子电池 GaAs 为研究对象,在能量分别为 1, 2, 5, 7, 10 MeV 的条件下开展了质子辐照损伤模拟研究,得到了子电池 GaAs 的短路电流、开路电压、转化因子、最大功率和外量子效率的退化规律,结合不同辐照条件下太阳电池内部参数的变化规律,深入分析了不同辐照条件下质子辐照诱发相关参数退化的机理。

## 2 理论模拟

本文利用 wxAMPS 太阳电池模拟软件<sup>[11]</sup>,建立了子电池 GaAs 的太阳电池模型,模拟了不同能量和注量质子辐照的子电池 GaAs 的辐照损伤。其中主要研究过程由模型建立、理论模拟、方程计算和参数获取组成。

子电池 GaAs 的结构模型如图 1 所示,子电池 GaAs 由窗口层( $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ )、N 型发射区(GaAs)、P 型基区(GaAs)和背面层(BSF,  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ )组成,三结太阳电池中的各子电池通过隧穿结(TJ)连接,其中  $E_g$  为半导体禁带宽度,窗口层的掺杂浓度(载流子浓度,全文同)为  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,发射区的掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,基区的掺杂浓度为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,背面层的掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。子电池 GaAs 的上表面为负极,下表面为正极。子电池的发射区和基区为子电池 GaAs 的主要工作区域,可吸收太阳光谱中特定波长范围内的光子,产生电子-空穴对;窗口层位于子电池 GaAs 的有源区上方,窗口层与子电池 GaAs 的发射区形成异质结,是子电池 GaAs 的重要结构,起到电流传输的作用,同时窗口层与子电池的发射区极性相反,可阻止发射区所产生的少数载流子向表面扩散,从而减小子电

池表面复合概率;与窗口层的作用相似,背面层与子电池 GaAs 的基区形成异质结,可阻止基区所产生的少数载流子向表面扩散,增大对光生载流子的收

集率,同时背面层会增加子电池对太阳光的反射率,从而增加太阳光利用率。GaAs 的其他材料参数如表 1 所示。

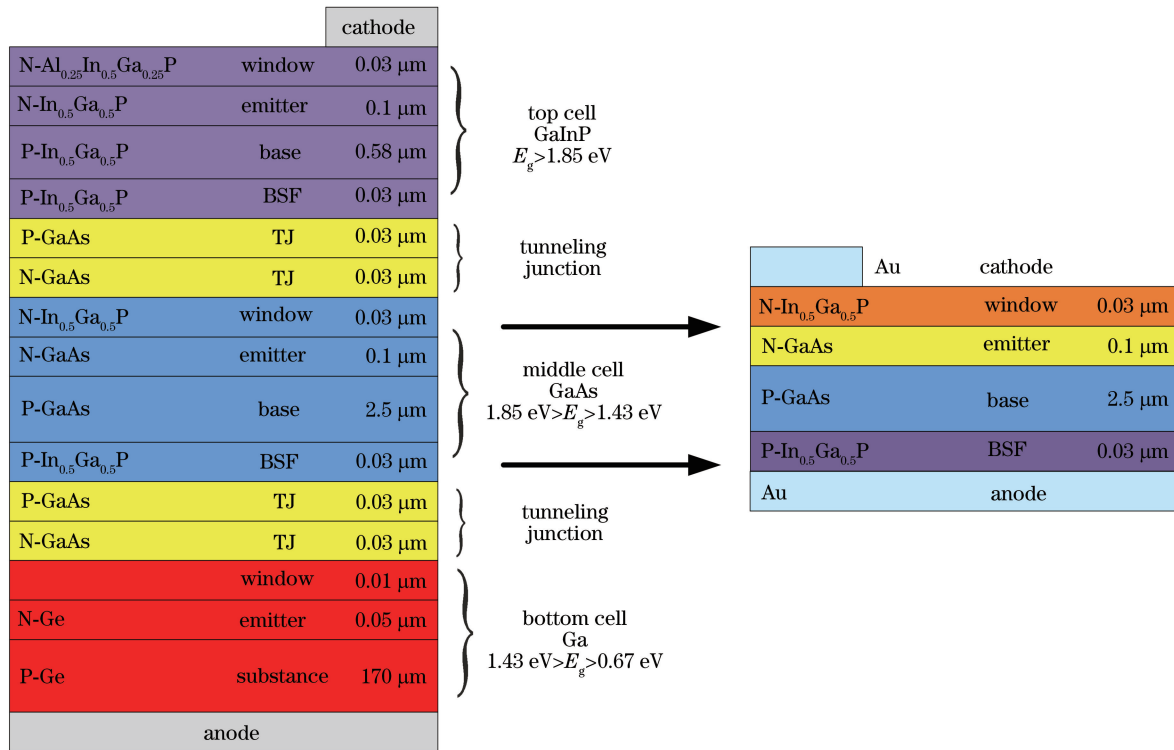


图 1 子电池 GaAs 的结构模型

Fig. 1 Structure model of GaAs sub-cell

表 1 模拟中 GaAs 的相关物理参数

Table 1 Related physical parameters of GaAs in simulation

Material parameter	Value
Dielectric constant	10.9
Band gap / eV	1.42
Electron affinity / eV	4.07
Electron mobility / (cm <sup>2</sup> · V <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )	8500
Hole mobility / (cm <sup>2</sup> · V <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )	400
Intrinsic carrier concentration / cm <sup>-3</sup>	2 × 10 <sup>6</sup>

当质子与晶格原子相互作用时,质子通过碰撞使晶格原子发生移动,晶格原子离开原来的晶格位置成为间隙原子,因此产生了大量辐照缺陷,其中包括空位、间隙原子、杂质等。相关研究<sup>[12]</sup>认为,质子辐照产生的电离辐照损伤不会显著诱发子电池性能退化,而质子辐照产生的位移辐照损伤是诱发子电池性能退化的主要原因。位移辐照损伤会导致半导体带隙产生非辐射复合中心,减少少数载流子寿命,降低多数载流子浓度。根据深能级瞬态谱 (Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS) 测试,得到位移辐照损伤产生的能级缺陷。表 2 为质子辐照后 DLTS 测试得到的子电池 GaAs 的深能级缺陷<sup>[13]</sup>,

其中质子辐照在 GaAs 中产生的空的受主能级缺陷类型为 H1~H4,施主能级缺陷类型为 E1~E4,  $E_v$  为价带能量,  $E_c$  为导带能量。利用表 2,通过建立不同辐照条件下的质子辐照缺陷模型,模拟了质子辐照诱发相关参数的退化情况。质子辐照会产生明显的 Bragg 峰,当质子能量较大时,不同能量的质子完全穿透子电池 GaAs 后,会在子电池 GaAs 内部产生均匀损伤。本文建立了不同辐照条件下的质子辐照缺陷模型,适当简化了不同能量和注量下的质

表 2 DLTS 测试得到的质子辐照后子电池 GaAs 的深能级缺陷<sup>[13]</sup>

Table 2 Deep-level defects of proton irradiated GaAs sub-cell obtained by DLTS measurement<sup>[13]</sup>

Deep level	Energy / eV	Defect introduction rate / cm <sup>-1</sup>
H1	$E_v + 0.18$	1.30
H2	$E_v + 0.23$	1.31
H3	$E_v + 0.27$	1.24
H4	$E_v + 0.77$	1.01
E1	$E_c - 0.14$	1.10
E2	$E_c - 0.25$	1.14
E3	$E_c - 0.54$	1.06
E4	$E_c - 0.72$	0.98

子辐照缺陷模型,认为不同能量和注量辐照条件下的能级缺陷浓度与位移损伤剂量呈正比,而能级位置和少数载流子俘获截面不发生变化。

在本文的模拟计算中,通过计算泊松方程和载流子连续性方程,求解载流子在太阳电池中的输运过程。光照模型采用 AM1.5 光谱模型,光照强度  $H_0 = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 光生载流子产生率<sup>[14]</sup>为

$$G(\lambda, x) = F(\lambda)\alpha(\lambda, x)(1 - R)\exp[-\alpha(\lambda, x)x], \quad (1)$$

式中:  $F(\lambda)$  为光子注量;  $\alpha(\lambda, x)$  为波长为  $\lambda$  时材料对光子的吸收率;  $R$  为表面反射率;  $x$  为入射深度。三结太阳电池相关参数<sup>[14]</sup>为

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \text{div} \mathbf{J}_n, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \text{div} \mathbf{J}_p, \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_n = -q\mu_n n \nabla E_n, \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_p = -q\mu_p p \nabla E_p, \quad (6)$$

式中:  $\text{div}(\cdot)$  为散度;  $\nabla$  为那勃勒算子;  $t$  为时间;  $q$  为单位电荷;  $\epsilon$  为局部介电常数;  $\psi$  为静电电势;  $\rho$  为局部空间电荷密度, 表征静电电势与空间电荷间的关系;  $n$  和  $p$  分别为电子和空穴的浓度;  $G_n$  和  $G_p$  分别为电子和空穴的生成率;  $R_n$  和  $R_p$  分别为电子和空穴的复合率;  $\mathbf{J}_n$  和  $\mathbf{J}_p$  分别为 N 区和 P 区的电流密度;  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为电子和空穴的迁移率;  $E_n$  和  $E_p$  分别为电子和空穴的本征费米能级。(2) 式为泊松方程; (3) 式和 (4) 式为载流子连续性方程, 用于描述  $n$  和  $p$  随时间变化的关系; (5) 式和 (6) 式为扩散-漂移输运方程, 用于表征电子和空穴的电流密度。为了模拟质子辐照所诱发的非辐射复合, 本文引入 SRH (Shockley-Read-Hall) 复合模型<sup>[14]</sup>, 即

$$U = \frac{v_{th} \sigma_n \sigma_p N_t (p_n n_n - n_i^2)}{\sigma_p \left[ p_n + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right] + \sigma_n \left[ n_n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right]}, \quad (7)$$

式中:  $v_{th}$  为载流子的热运动速度;  $N_t$  为复合中心浓度;  $\sigma_n$  和  $\sigma_p$  分别为电子和空穴的俘获截面;  $p_n$  和  $n_n$  分别为 N 型半导体中的空穴浓度和电子浓度;  $n_i$  和  $E_i$  分别为本征载流子浓度和本征载流子费米能级;  $E_t$  为缺陷能级;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 模拟结果的验证

为了验证模拟结果的准确性, 对比了三结太阳电池的归一化最大输出功率随质子注量变化的模拟结果与实验结果<sup>[6,15]</sup>。在 5 MeV 和 10 MeV 质子辐照下, 子电池 GaAs 的归一化最大输出功率随质子注量变化的模拟结果与实验结果如图 2 所示。其中离散点表示实验结果, 连续曲线表示模拟结果。由图 2 可见, 子电池 GaAs 的归一化最大输出功率随质子注量的增加而逐渐减小, 同时模拟得到归一化的最大输出功率随质子注量的退化结果与实验结果吻合, 模拟结果的准确性得到验证。

#### 3.2 短路电流密度的退化分析

太阳电池受到光源照射后, 当输出端处于短路状态时, 流过太阳电池两端的电流为短路电流。在

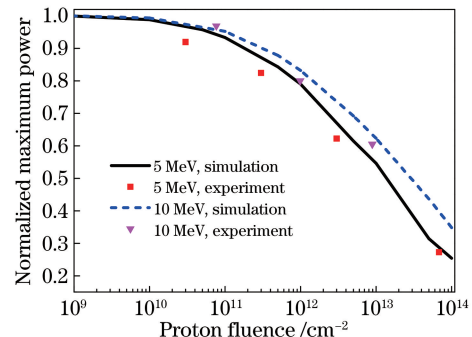


图 2 在 5 MeV 和 10 MeV 质子辐照下子电池 GaAs 的归一化最大输出功率随质子注量的退化结果

Fig. 2 Degradation results of normalized maximum power of GaAs sub-cell irradiated by 5 MeV and 10 MeV protons versus proton fluence

不同能量质子辐照条件下, 子电池 GaAs 的归一化短路电流密度随质子注量的退化结果如图 3 所示。由图 3 可见, 随着质子注量的增加, 子电池 GaAs 的归一化短路电流密度逐渐减小, 当质子注量小于  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  时, 质子辐照所诱发的短路电流密度的退化幅度较小, 当辐照注量大于  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  时, 子电池 GaAs 的短路电流密度的退化幅度较大, 归一化短路电流密度的退化幅度与注量增量的对数值近似成正比。当质子注量相同时, 子电池 GaAs

短路电流的退化幅度随质子能量的减小而逐渐增加。子电池 GaAs 的有源区本质为 P-N 结,当 N 型发射区和 P 型基区相连接时,在截面处形成 P-N 结,如图 4 所示。太阳光谱中的不同波长的光子照射到太阳电池后,能量大于 GaAs 带隙宽度的光子会被吸收。在 GaAs 材料中,N 型发射区的少数载流子空穴和 P 型基区的少数载流子电子从价带跃迁到导带,扩散长度范围内的电子和空穴扩散到结区,电子和空穴在结区间的内建电场作用下发生定向运动,对外输出电流。

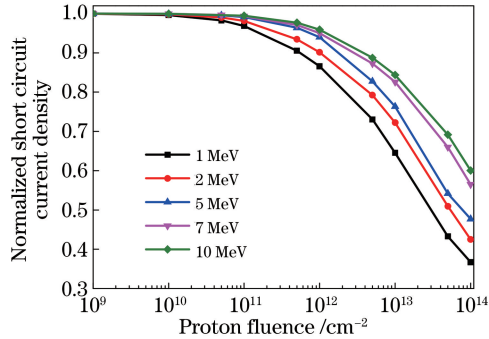


图 3 不同辐照能量下子电池 GaAs 的归一化短路电流密度随质子注量的退化结果

Fig. 3 Degradation results of normalized short-circuit current density of GaAs sub-cell versus proton fluence for different irradiation energies

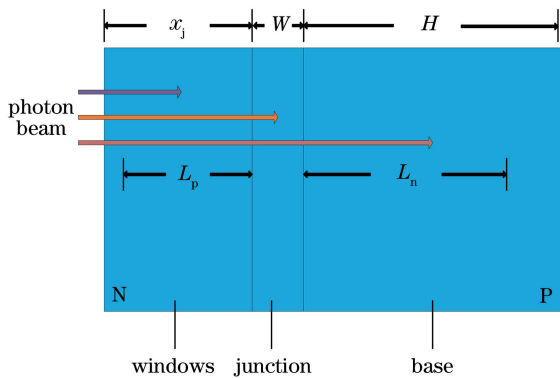


图 4 子电池 GaAs 的有源区光子吸收示意图

Fig. 4 Schematic of photon absorption in active region of GaAs sub-cell

质子辐照下子电池 GaAs 短路电流的退化主要是由于电子扩散长度  $L_n$  和空穴扩散长度  $L_p$  的减小。质子辐照下少数载流子的扩散长度与辐照注量的关系<sup>[16]</sup>为

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \Phi, \quad (8)$$

式中: $L_0$  和  $L$  分别为质子辐照前、后少数载流子的扩散长度; $K_L$  为少数载流子的损伤系数; $\Phi$  为质子

注量。随着质子注量的增加,少数载流子的扩散长度逐渐减小,少数载流子扩散到结区时对应子电池 GaAs 的发射区和基区的区域变小,诱发少数载流子被非辐射复合中心俘获,导致子电池 GaAs 的短路电流密度发生退化。 $K_L$  随质子能量的增加而逐渐减小,在相同质子注量下,少数载流子的扩散长度的退化程度随能量的减小而逐渐增加,诱发子电池 GaAs 短路电流的退化密度随能量的减小而逐渐增大。

### 3.3 开路电压的退化分析

不同能量质子辐照条件下子电池 GaAs 的归一化开路电压随质子注量的退化结果如图 5 所示。由图 5 可知,随着质子注量的增加,子电池 GaAs 的开路电压逐渐减小。与短路电流密度的退化趋势相近,当质子注量小于  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  时,开路电压的退化幅度随质子注量的增加而减小。当质子注量大于  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  时,开路电压退化幅度的归一化值与质子注量增加量的对数值成正比。假定子电池 GaAs 内的杂质均发生电离,子电池的开路电压可以表示<sup>[17]</sup>为

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2}, \quad (9)$$

式中: $n_n$  为多数载流子的电子浓度; $p_p$  为多数载流子的空穴浓度。质子辐照诱发多数载流子浓度减小<sup>[17]</sup>:

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-R_c \Phi}{n_0}\right), \quad (10)$$

式中: $n_0$  和  $n$  分别为质子辐照前、后的多数载流子浓度; $R_c$  为多数载流子的去除系数。随着质子注量的增加,多数载流子浓度逐渐减小。结合(9)式可知,随着多数载流子浓度的减小,子电池 GaAs 的开路电压减小。 $R_c$  随质子能量的减小而逐渐增加,因此在相同质子注量下,子电池 GaAs 开路电压的退化幅度随质子能量的减小而逐渐增大。

### 3.4 填充因子的退化分析

太阳能电池的填充因子(Fill Factor, FF)表达式<sup>[18]</sup>为

$$F_{FF} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}, \quad (11)$$

式中: $F_{FF}$  为填充因子; $V_m$  和  $I_m$  分别为太阳能电池达到最大输出功率时对应的电压值和电流值; $I_{sc}$  为短路电流。

在不同辐照能量下,子电池 GaAs 的填充因子随质子注量的退化结果如图 6 所示。质子辐照诱发

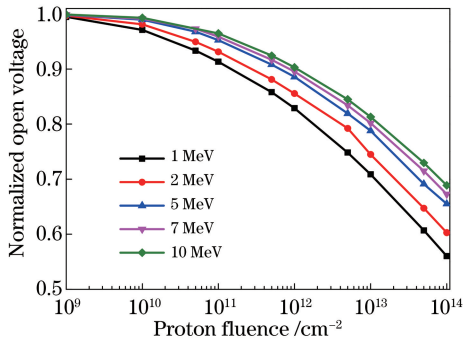


图 5 不同辐照能量下子电池 GaAs 的归一化开路电压随质子注量的退化结果

Fig. 5 Degradation results of normalized open voltage of GaAs sub-cell versus proton fluence for different irradiation energies

子电池 GaAs 填充因子发生退化,随着质子注量的增加,子电池 GaAs 填充因子的退化幅度逐渐增加,子电池 GaAs 光电转化效率的退化幅度逐渐增加。随着质子能量的减小,子电池光电转化效率的退化幅度逐渐增加。

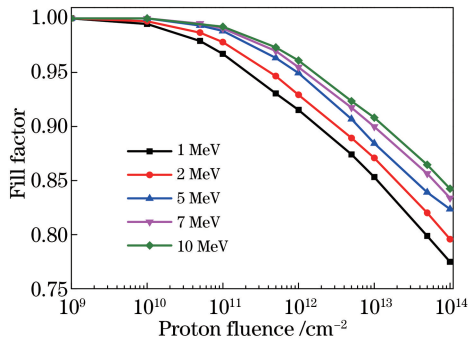


图 6 不同辐照能量下子电池 GaAs 的填充因子随质子注量的退化结果

Fig. 6 Degradation results of normalized fill factor of GaAs sub-cell versus proton fluence for different irradiation energies

### 3.5 最大功率的退化分析

不同辐照能量下子电池 GaAs 的归一化最大功率随质子注量的退化结果如图 7 所示。由图 7 可知,子电池 GaAs 的最大功率随着质子注量的增加逐渐减小。在相同质子注量下,子电池 GaAs 最大功率的退化幅度随着质子能量的减小而逐渐增大。子电池 GaAs 最大功率退化与质子注量的特征方程<sup>[19]</sup>为

$$\frac{P_{\max}}{P_{\max 0}} = 1 - C \lg\left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_0}\right), \quad (12)$$

式中: $C$  为特征参数; $P_{\max 0}$  和  $P_{\max}$  分别为质子辐照前、后子电池 GaAs 的最大功率; $\Phi_0$  为最大功率退

化幅度的归一化值与注量的对数值成正比时的质子注量。质子辐照所产生的位移辐照损伤是诱发子电池 GaAs 退化的主要原因。针对不同能量质子辐照所诱发的相关参数的退化,位移辐照损伤可以表示为

$$D_{\text{DDD}} = N_{\text{NIEL}} \times \Phi, \quad (13)$$

式中: $D_{\text{DDD}}$  为位移损伤剂量(Displacement Damage Dose,DDD); $N_{\text{NIEL}}$  为质子的非电离能量损失(Non-ionizing Energy Loss,NIEL)。NIEL 随着质子能量的减小而逐渐增加,在相同质子注量下,质子的位移损伤剂量随着质子能量的减小而逐渐增加。质子辐照导致的缺陷浓度随位移损伤剂量的增加逐渐增加,进而子电池 GaAs 电学参数的退化幅度随质子辐照能量的减小而逐渐增加。

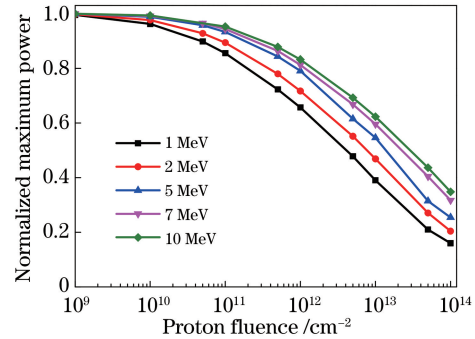


图 7 不同辐照能量下子电池 GaAs 的归一化最大功率随质子注量的退化结果

Fig. 7 Degradation results of normalized maximum power of GaAs sub-cell versus proton fluence for different irradiation energies

结合(13)式,计算了不同辐照条件下的位移损伤剂量,得到了 5 种辐照能量下子电池 GaAs 的归一化最大功率随位移损伤剂量的退化结果,如图 8 所示。根据不同辐照条件下子电池 GaAs 归一化最大功率的退化结果,拟合得到子电池 GaAs 的归一化最大功率随质子位移损伤剂量的退化方程<sup>[20]</sup>:

$$\frac{P_{\max}}{P_{\max 0}} = 1 - C \lg\left(1 + \frac{D}{D_0}\right), \quad (14)$$

式中: $D$  为该辐照条件下的位移损伤剂量; $D_0$  为最大功率退化幅度的归一化值与注量的对数值成正比时的位移损伤剂量。(14)式中, $C$  为 0.2488, $D_0$  为  $1.901 \times 10^9 \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1}$ 。当  $D$  小于  $D_0$  时,子电池 GaAs 最大功率的退化幅度较小。当  $D$  大于  $D_0$  时,子电池最大功率的退化幅度与位移损伤剂量的对数值近似成正比。利用拟合的物理方程,通过计算不同质子辐照条件下的位移损伤剂量,对不同辐照条件下的子电池 GaAs 最大功率的退化结果进行

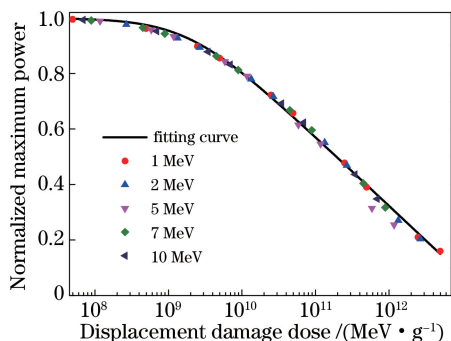


图 8 子电池 GaAs 的归一化最大功率随位移损伤剂量的退化结果

Fig. 8 Degradation result of normalized maximum power of GaAs sub-cell versus displacement damage dose

了预估。

### 3.6 光谱响应的退化分析

外量子效率(EQE)表示在一定波长的光照条件下,三结太阳能电池中产生电子-空穴对的效率。外量子效率可以表示为

$$E_{EQE}(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{qAQ(\lambda)}, \quad (15)$$

式中: $Q(\lambda)$ 为入射光子密度; $J_{sc}(\lambda)$ 为波长为 $\lambda$ 的入射光子的短路电流密度; $A$ 为太阳电池表面积。当质子注量为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时,不同能量质子辐照后子电池 GaAs 的外量子效率如图 9 所示。由图 9 可见,质子辐照诱发子电池 GaAs 的外量子效率发生退化。在相同注量下,子电池外量子效率的退化幅度随质子能量的减小而逐渐增大,这与辐照诱发的子电池 GaAs 电学参数的退化趋势相同。根据(15)式可知,外量子效率与短路电流密度成正比。结合 3.1 节分析可知,在相同注量下,少数载流子扩散长度的退化幅度随着质子能量的减小而逐渐增

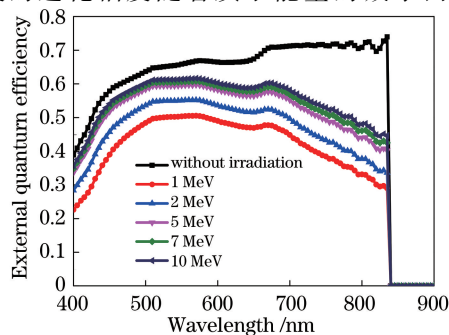


图 9 当质子注量为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时,不同能量质子辐照后子电池 GaAs 的外量子效率

Fig. 9 External quantum efficiencies of GaAs sub-cell for different proton irradiation energies when proton fluence is  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$

加,因此,质子辐照诱发的子电池外量子效率的退化幅度随质子能量的减小而逐渐增加。

在不同光谱波长处,质子辐照诱发的子电池 GaAs 外量子效率的退化幅度差异较大,子电池 GaAs 的外量子效率在 700~850 nm 长波范围内的退化幅度大于其在 400~700 nm 短波范围内的退化幅度。不同波长下子电池 GaAs 外量子效率的退化幅度与不同结构下质子诱发的子电池 GaAs 损伤有关。其中,400~700 nm 波长范围内的光子主要由子电池 GaAs 的 N 型发射区所吸收,而 700~850 nm 长波范围内的光子主要由子电池 GaAs 的 P 型基区所吸收。子电池 GaAs 的发射区厚度小于基区厚度,相比位于发射区顶部且距结区较远的少数载流子,位于基区底部且距结区较远的少数载流子更难扩散到结区,因此长波范围内外量子效率的退化幅度比短波范围内外量子效率的退化幅度更大。

## 4 结 论

以子电池 GaAs 为研究对象,利用软件模拟方法,在质子能量分别为 1,2,5,7,10 MeV 的条件下开展了质子辐照模拟研究,得到了不同能量质子辐照条件下子电池 GaAs 的相关电学参数(短路电流、开路电压、填充因子、最大功率)随质子注量的退化结果。质子辐照产生的辐照缺陷是诱发电学参数和光学参数退化的直接原因。子电池 GaAs 的短路电流、开路电压、转化因子和最大功率随质子注量的增加而逐渐减小。在相同质子注量下,子电池 GaAs 相关电学参数的退化幅度随质子能量的减小而逐渐增加。质子辐照诱发子电池 GaAs 的外量子效率发生退化,外量子效率在 700~850 nm 长波范围内的退化幅度大于其在 400~700 nm 短波范围内的退化幅度。

### 参 考 文 献

- [1] Yan Y Y, Fang M H, Tang X B, et al. Effect of 150 keV proton irradiation on the performance of GaAs solar cells [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 451: 49-54.
- [2] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, et al. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56 (4):

040003.  
袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040003.
- [3] Qi L, Zhang R Z. Damage characteristics of three-junction GaAs cell under combined pulse laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0514002.  
戚磊, 张蓉竹. 复合脉冲激光辐照下三结 GaAs 电池的损伤特性[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0514002.
- [4] Nobuaki K, Masato N, Hidetoshi S. Novel materials for high-efficiency solar cells [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7518: 75180P1.
- [5] Wu Y Y, Yue L, Hu J M, et al. Radiation damage of space GaAs/Ge solar cells evaluated by displacement damage dose[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9): 723-732.  
吴宜勇, 岳龙, 胡建民, 等. 位移损伤剂量法评估空间 GaAs/Ge 太阳电池辐照损伤过程[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 723-732.
- [6] Wang R, Guo Z L, Zhang X H, et al. 5-20 MeV proton irradiation effects on GaAs/Ge solar cells for space use [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2003, 77(4): 351-357.
- [7] Kazantsev A B, Lammasniemi J, Jaakkola R, et al. Radiation resistance of MBE-grown GaInP/GaAs-based solar cells [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1998, 6(1): 75180P.
- [8] Leem J W, Yu J S, Kim J N, et al. Theoretical modeling and optimization of III-V GaInP/GaAs/Ge monolithic triple-junction solar cells [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2014, 64(10): 1561-1565.
- [9] Turowski M, Bald T, Raman A, et al. Simulating the radiation response of GaAs solar cells using a defect-based TCAD model[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2477-2485.
- [10] Fu S, Guo H L, Jiang H P, et al. Simulation of high energy electron damage of triple junction solar cell [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(4): 392-398.  
付帅, 郭宏亮, 江濠鹏, 等. 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.
- [11] Liu Y M, Sun Y, Rockett A. A new simulation software of solar cells: wxAMPS[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 98: 124-128.
- [12] Xu Y, Heini M, Shen X B, et al. Spectral and electrical properties of 3 MeV and 10 MeV proton irradiated InGaAsP single junction solar cell [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(3): 032008.
- [13] González M, Andre C L, Walters R J, et al. Deep level defects in proton radiated GaAs grown on metamorphic SiGe/Si substrates [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(3): 034503.
- [14] Silvaco International. [2020-04-15]. <http://www.silvaco.com>.
- [15] Hu J M. Radiation effects of space charged particules and methods of predicting degradation of performance in orbit for GaAs solar cells [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.  
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.
- [16] Augustine G, Rohatgi A, Jokerst N M. Base doping optimization for radiation-hard Si, GaAs, and InP solar cells [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1992, 39(10): 2395-2400.
- [17] Zuleeg R, Lehovc K. Radiation effects in GaAs junction field-effect transistors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1980, 27(5): 1343-1354.
- [18] Yan Y P, Tu J L, Aierken A, et al. Electron irradiation performance of GaInP/Ga(In)As/Ge triple junction solar cell based on Bragg reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1631001.  
颜远平, 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): 1631001.
- [19] Anspaugh B E. GaAs solar cell radiation handbook [M]. Charleston, South Carolina, United States: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.