

GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池不同能量质子辐照损伤模拟

李俊炜 王祖军 石成英 薛院院 宁浩 徐瑞 焦仟丽 贾同轩

Modeling and simulating of radiation effects on the performance degradation of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells induced by different energy protons

Li Jun-Wei Wang Zu-Jun Shi Cheng-Ying Xue Yuan-Yuan Ning Hao Xu Rui Jiao Qian-Li Jia Tong-Xuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 098802 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191878

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191878>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晶格失配对GaInP/In_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As倒装三结太阳能电池性能影响的分析

Analyses of the effect of mismatch on the performance of inverted GaInP/In_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As triple-junction solar cells

物理学报. 2017, 66(4): 048801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.048801>

p层空穴浓度及厚度对InGaN同质结太阳能电池性能的影响机理研究

Effects of p-layer hole concentration and thickness on performance of p-i-n InGaN homojunction solar cells

物理学报. 2019, 68(19): 196103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191042>

空间用倒装三结太阳能电池及其抗辐射性能研究

Inverted metamorphic triple-junction solar cell and its radiation hardness for space applications

物理学报. 2017, 66(18): 188801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.188801>

色散效应对聚光多结太阳能电池性能的影响及优化

Effect of chromatic aberration on performance of concentrated multi-junction solar cells and their optimization

物理学报. 2017, 66(14): 148801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.148801>

硅异质结太阳能电池的物理机制和优化设计

Physical mechanism and optimal design of silicon heterojunction solar cells

物理学报. 2017, 66(10): 108801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.108801>

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池不同 能量质子辐照损伤模拟*

李俊炜¹⁾ 王祖军^{2)†} 石成英¹⁾ 薛院院^{2)‡} 宁浩³⁾
徐瑞³⁾ 焦仟丽³⁾ 贾同轩³⁾

1) (西安高科技研究所, 西安 710025)

2) (强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西北核技术研究院, 西安 710024)

3) (湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

(2019年12月11日收到; 2020年1月7日收到修改稿)

以 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池为研究对象, 开展了能量为 0.7, 1, 3, 5, 10 MeV 的质子辐照损伤模拟研究, 建立了三结太阳能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, 结合已有实验结果验证了本文模拟结果, 分析了三结太阳能电池短路电流、开路电压、最大功率、光谱响应随质子能量的变化规律, 利用不同辐照条件下三结太阳能电池最大输出功率退化结果, 拟合得到了三结太阳能电池最大输出功率随位移损伤剂量的退化曲线. 研究表明, 质子辐照会在三结太阳能电池中引入位移损伤缺陷, 使得少数载流子扩散长度退化幅度随质子能量的减小而增大, 从而导致三结太阳能电池相关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, 中电池光谱响应退化幅度远大于顶电池光谱响应退化幅度, 中电池抗辐照性能较差, 同时中电池长波范围内光谱响应的退化幅度比短波范围更大, 表明中电池相关电学参数的退化主要来源于基区损伤.

关键词: 三结太阳能电池, 辐照缺陷, 质子辐照模型, 数值模拟

PACS: 88.40.hj, 81.40.Wx, 07.89.+b, 78.55.Cr

DOI: 10.7498/aps.69.20191878

1 引言

空间太阳能电池可以直接将太阳能转化为电能, 被广泛应用于航天器的电能供应系统. 空间太阳能电池主要包括非晶硅太阳能电池、单结太阳能电池和 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池. 单结太阳能电池仅由单一禁带宽度材料制成, 只能吸收特定波长下的太阳光谱, 不能对整个波段的太阳光谱充分利用, 而利用不同禁带宽度的材料制成的三结太阳能电池,

每一种材料可以对太阳光谱中不同波长进行选择吸收, 提高了对太阳光谱的利用率. 相比于 Si 和 GaAs 单结太阳能电池, 三结太阳能电池具有光电转化效率高、光吸收系数高、结构稳定、价格低廉等优点, 正逐步取代 GaAs 单结太阳能电池, 成为航天器主要应用的太阳能电池^[1-4].

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池在轨运行时将受到空间中质子、电子及少量重离子的辐照作用^[5-7]. 三结太阳能电池粒子辐照损伤的相关研究表明, 质子会通过碰撞使三结太阳能电池晶格原子位

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875223, 11805155)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDA15015000)、强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室 (批准号: SKLIPR1803, 1903Z) 和抗辐照应用技术创新基金 (批准号: KFZC2018040201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangzujun@nint.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: xueyuanyuan@nint.ac.cn

移, 晶格原子离开原来的晶格位置成为间隙原子, 而原来的晶格位置成为空位缺陷. 空位缺陷导致三结太阳能电池相关电学参数发生退化, 随着三结太阳能电池受空间粒子辐照时间的增长, 空位缺陷的持续增加, 最终将导致三结太阳能电池的失效^[8,9]. 因此开展三结太阳能电池质子辐照损伤的研究具有重要意义.

目前, 国内外均开展了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池空间质子辐照损伤相关研究, 但相关研究以实验研究为主, 理论模拟研究开展较少, 目前, 以三结太阳能电池为研究对象, 主要进行了不同能量和注量下质子辐照实验, 给出了三结太阳能电池开路电压、短路电流、转化因子、最大功率和量子效率与辐照质子能量和注量的关系^[10-12]. 相关研究结果表明, 质子辐照导致三结太阳能电池相关电学参数发生退化, 随着辐照注量的增加, 相关电学参数的退化更显著, 但由于三结太阳能电池结构的多样性、辐照条件的局限性、实验数据的不确定性, 已开展的不同能量和注量下质子辐照实验研究, 只能分析特定能量和注量的质子辐照损伤, 不能够分析完整空间能谱下的质子辐照损伤^[13,14]. 与实验研究相比, 理论模拟技术具有成本低、耗时短、数据量大等特点, 在研究三结太阳能电池辐射损伤评估及抗辐照加固技术方面具有独到的优势.

为系统探究质子辐照诱发三结太阳能电池相关电学参数退化规律, 深入分析三结太阳能电池质子辐照损伤机理, 本文利用 wxAMPS 太阳能电池模拟软件^[15], 以 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池为研究对象, 开展了能量为 0.7, 1, 3, 5, 10 MeV 质子辐照损伤模拟研究, 并对模拟结果进行验证, 得到了三结太阳能电池短路电流、开路电压、外量子效率和最大输出功率与辐照质子能量和注量关系, 结合器件内部参数变化分析了三结太阳能电池质子辐照损伤物理机理, 研究结果为三结太阳能电池的空间质子辐照损伤评估及抗辐射加固技术提供理论基础和试验技术支持.

2 理论模拟

本文开展的三结太阳能电池质子辐照损伤模拟研究, 主要包括模型构建和模拟计算两部分, 其中模型构建包括三结太阳能电池结构模型构建和质子辐照缺陷模型构建.

2.1 模型构建

2.1.1 三结太阳能电池结构模型

三结太阳能电池模型由 GaInP 顶电池、GaAs 中电池、Ge 底电池模型通过掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{p}^+\text{-GaAs}/\text{n}^+\text{-GaAs}$ 隧穿结串联而成. $\text{Al}_{0.25}\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.25}\text{P}$, $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 窗口层的掺杂浓度均为 $1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 背面场的掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 三结太阳能电池其他材料参数的设置参照文献^[16]. 三结太阳能电池结构模型如图 1 所示.

Au	负极		
N-Al _{0.25} In _{0.5} Ga _{0.25} P	窗口层	0.03 μm	顶电池 GaInP $E_g > 1.85 \text{ eV}$
N-In _{0.5} Ga _{0.5} P	发射区	0.1 μm	
P-In _{0.5} Ga _{0.5} P	基区	0.58 μm	
P-In _{0.5} Ga _{0.5} P	背面场	0.03 μm	
P-GaAs	隧穿结	0.03 μm	隧穿结
N-GaAs	隧穿结	0.03 μm	
N-In _{0.5} Ga _{0.5} P	窗口层	0.03 μm	中电池 GaAs $1.85 \text{ eV} > E_g > 1.43 \text{ eV}$
N-GaAs	发射区	0.1 μm	
P-GaAs	基区	2.5 μm	
P-In _{0.5} Ga _{0.5} P	背面场	0.03 μm	
P-GaAs	隧穿结	0.03 μm	隧穿结
N-GaAs	隧穿结	0.03 μm	
N-In _{0.5} Ga _{0.5} P	窗口层	0.01 μm	底电池 Ge $1.43 \text{ eV} > E_g > 0.67 \text{ eV}$
N-Ge	发射区	0.05 μm	
P-Ge	衬底	50 μm	
Au	正极		

图 1 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池结构模型

Fig. 1. Structure parameters of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells.

2.1.2 质子辐照缺陷模型

质子辐照在三结太阳能电池中产生位移损伤, 不同质子辐照条件的位移损伤可以统一用位移损伤剂量 D_d 表示:

$$D_d = NIEL \times \phi, \quad (1)$$

其中 $NIEL$ (non ionizing energy loss) 为质子非电离能量损失, 表示质子用于产生位移效应的比能量, ϕ 为辐照注量. 位移损伤引入的多种能级缺陷, 是造成三结太阳能电池相关电学性能退化的主要原因^[17], 可通过建立质子辐照缺陷模型模拟质子辐照对三结太阳能电池产生的影响. 模型中能级位置、浓度、载流子俘获截面, 根据深瞬态能级谱 (deep

level transient spectroscopy, DLTS) 测试结果确定. 相关研究表明, 当质子能量较高, 足够穿透中电池时, 在三结太阳能电池器件敏感区域近似产生均匀损伤缺陷, 不同能量和注量下的质子辐照主要使能级缺陷浓度发生变化, 而能级位置和载流子俘获截面变化较小^[18,19]. 因此为了方便模拟的开展, 同时保证模拟的准确性, 在本文的模拟中, 对三结太阳能电池质子辐照缺陷模型进行适度简化: 1) 除质子辐照缺陷外, 未对三结太阳能电池设置其他能级缺陷; 2) 在顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 中设置辐照缺陷, 在底电池 Ge 未设置辐照缺陷, 因为在质子辐照后, 底电池 Ge 仍产生很大电流, 不会影响

三结太阳能电池输出电流, 同时由于底电池 Ge 对外输出电压较小, 不会明显影响三结太阳能电池输出电压; 3) 质子能级缺陷浓度与位移损伤剂量成正比. 表 1^[19] 和表 2^[20] 列出了能量为 3 MeV, 注量为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 质子辐照后, 利用 DLTS 测试得到的顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 的能级缺陷, 其中 E 为缺陷能级, N_T 为缺陷浓度.

2.2 模拟计算

通过计算三结太阳能电池泊松方程, 电子和空穴的连续性方程, 求解三结太阳能电池相关物理量. 非平衡稳态下, 电子和空穴连续性方程为^[21]

$$D_n \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_n(x) = 0, \quad (2)$$

$$D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_p(x) = 0, \quad (3)$$

式中 D_n 和 D_p 为电子和空穴扩散系数, τ_n 和 τ_p 分别为 P 区少数载流子 (电子) 和 N 区少数载流子 (空穴) 的平均寿命, $G_n(x)$ 和 $G_p(x)$ 为电子和空穴产生率. 模拟计算中太阳光谱模型采用 AM0 (Air Mass 0) 标准光谱, 光照强度 $H_0 = 1367 \text{ W/m}^2$. 太阳光谱中不同波长的光照射到太阳能电池后, 太阳能电池光生载流子的产生率为

$$G(\lambda, x) = F(\lambda)\alpha(\lambda, x)(1 - R) \exp[-\alpha(\lambda, x)x], \quad (4)$$

其中 $F(\lambda)$ 为波长为 λ 时, 入射光的光通量; $\alpha(\lambda, x)$ 为波长为 λ 时, 材料对光子吸收率; R 为表面反射率; x 为入射深度. 针对质子辐照产生的能级缺陷, 本文引入 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合模型^[22]:

$$R_{\text{SRH}} = \sum_{\alpha=1}^m R_{A_\alpha} + \sum_{\beta=1}^n R_{D_\beta}, \quad (5)$$

其中, R_{SRH} 为 SRH 复合率, R_{A_α} 和 R_{D_β} 分别为受主缺陷和施主缺陷复合率, m 和 n 分别为受主缺陷和施主缺陷数目. R_{A_α} 和 R_{D_β} 表达式如下:

$$R_{A_\alpha} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left[n + gn_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \tau_n \left[p + \frac{1}{g} n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]}, \quad (6)$$

$$R_{D_\beta} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left[n + \frac{1}{g} n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \tau_n \left[p + gn_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]}, \quad (7)$$

表 1 能量为 3 MeV, 注量为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 质子辐照后, 顶电池 GaInP 的能级缺陷^[19]

Table 1. GaInP defect parameters after 3 MeV proton irradiation with the fluence of $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

Deep level	E/eV	$N_T/10^{14} \text{ cm}^{-3}$
H1	$E_v + 0.55 \text{ eV}$	2.70
H2	$E_v + 0.71 \text{ eV}$	4.05
H3	$E_v + 0.90 \text{ eV}$	1.80
E1	$E_c - 0.20 \text{ eV}$	4.60
E2	$E_c - 0.36 \text{ eV}$	1.00
E3	$E_c - 0.54 \text{ eV}$	2.22
E4	$E_c - 0.79 \text{ eV}$	3.60

表 2 能量为 3 MeV, 注量为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 质子辐照后, 中电池 GaAs 的能级缺陷^[20]

Table 2. GaAs defect parameters after 3 MeV proton irradiation with the fluence of $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

Deep level	E/eV	$N_T/10^{14} \text{ cm}^{-3}$
H1	$E_v + 0.18 \text{ eV}$	4.030
H2	$E_v + 0.23 \text{ eV}$	4.370
H3	$E_v + 0.27 \text{ eV}$	4.790
H4	$E_v + 0.77 \text{ eV}$	1.780
E1	$E_c - 0.14 \text{ eV}$	1.600
E2	$E_c - 0.25 \text{ eV}$	0.448
E3	$E_c - 0.54 \text{ eV}$	0.557
E4	$E_c - 0.72 \text{ eV}$	2.480

其中, p 为空穴浓度, n 为电子浓度, n_i 为本征载流子浓度, g 为退化因子, E_i 为本征费米能级, E_t 为缺陷能级, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度.

3 结果讨论与分析

3.1 模型结果的验证

为了验证模拟结果的准确性, 对比三结太阳能电池归一化最大输出功率随辐照注量变化的模拟与实验结果^[23]. 1 和 3 MeV 质子辐照下, 三结太阳能电池归一化最大输出功率随辐照注量变化的模拟与实验结果, 如图 2 所示. 图中连续曲线表示模拟结果, 离散点表示实验结果. 从图 2 可见, 随着辐照注量的增加, 三结太阳能电池归一化最大功率逐渐减小, 归一化最大输出功率随辐照注量变化模拟结果与实验结果趋势相近, 两者符合性较高, 模拟结果的准确性得到验证.

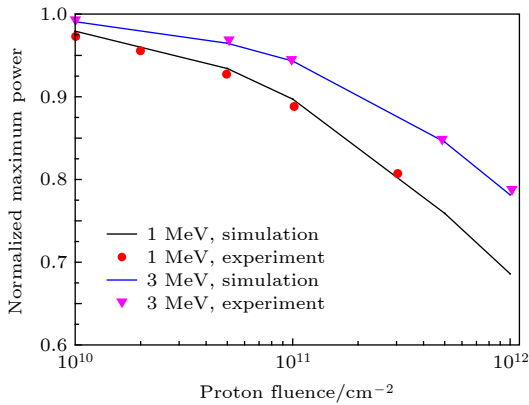


图 2 最大输出功率随辐照注量变化的模拟与实验结果
Fig. 2. Normalized maximum power versus fluence at the proton irradiation energy of 1 and 3 MeV (symbols and lines are experimental and simulation results respectively).

3.2 I-V 特征曲线退化分析

为研究三结太阳能电池电学参数随质子能量的变化关系, 本节利用理论模拟方法, 得到不同质子能量和辐照注量下, 三结太阳能电池 $I-V$ 特征曲线, 结果如图 3 所示. 图 3(a)—(e) 分别表示能量为 0.7, 1, 3, 5, 10 MeV 的质子辐照. 从图 3 可知, 三结太阳能电池 $I-V$ 特征曲线退化幅度随质子能量的减小而增大. 同时, 相同质子能量下, 三结太阳能电池 $I-V$ 特征曲线的退化幅度随辐照注量的增加而增大. 在辐照注量小于 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 三结太阳能电池 $I-V$ 特征曲线没有明显退化, 但当辐照注量大

于 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 后, 三结太阳能电池 $I-V$ 特征曲线发生明显退化. 质子辐照导致三结太阳能电池中产生体缺陷, 体缺陷会在材料禁带中引入非辐射能级缺陷, 非辐射能级缺陷充当少数载流子复合中心, 增加少数载流子非辐射复合, 进而导致少数载流子寿命减小, 少数载流子扩散长度减小, 从而导致三结太阳能电池相关参数退化 (其中 $I-V$ 曲线与 X 轴的交点为开路电压, 曲线与 Y 轴交点为短路电流密度. 当三结太阳能电池外接负载电阻无穷大, 电路电流为零时, 三结太阳能电池的电压为开路电压. 当三结太阳能电池外接负载电阻为零时, 此时三结太阳能电池的电流为短路电流). 针对三结太阳能电池短路电流、开路电压的退化机理, 在后文中将进行具体分析.

3.3 短路电流退化分析

为研究不同能量的质子辐照对三结太阳能电池中短路电流的影响, 本节对不同能量质子辐照下三结太阳能电池短路电流退化结果进行分析 (以短路电流密度 J_{sc} 表征). 不同能量质子辐照下, 三结太阳能电池归一化短路电流随辐照注量变化的模拟结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 三结太阳能电池短路电流退化幅度随质子辐照能量的增加而减小. 辐照注量为 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 当质子能量达到 0.7 MeV 时, 三结太阳能电池短路电流衰减到初始值的 0.82, 而当质子能量达到 10 MeV 时, 短路电流衰减到初始值的 0.95. 同时从图 4 可以看出, 随着辐照注量的逐渐增加, 短路电流退化幅度逐渐增大, 当辐照注量大于 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 归一化短路电流退化幅度与辐照注量增加的对数值近似呈线性关系. 三结太阳能电池短路电流为各子电池短路电流的最小值, 子电池短路电流的退化是导致三结太阳能电池短路电流退化的直接原因, 因此首先对子电池短路电流退化进行分析. 当入射太阳光为连续光谱时, 对 (4) 式进行积分, 子电池在连续光谱下载流子产生率为

$$G(x) = \int \alpha(\lambda, x) F(\lambda) (1-R) \exp[-\alpha(\lambda, x)x] d\lambda, \quad (8)$$

在忽略表面复合的情况下, 子电池短路电流为

$$J_{sc} = q \int_0^H G(x) dx = J_p + J_d + J_n, \quad (9)$$

其中 q 为电荷电量, H 为子电池厚度, J_p 为 N 型发射区电流密度, J_d 为耗尽区电流密度, J_n 为 P 型

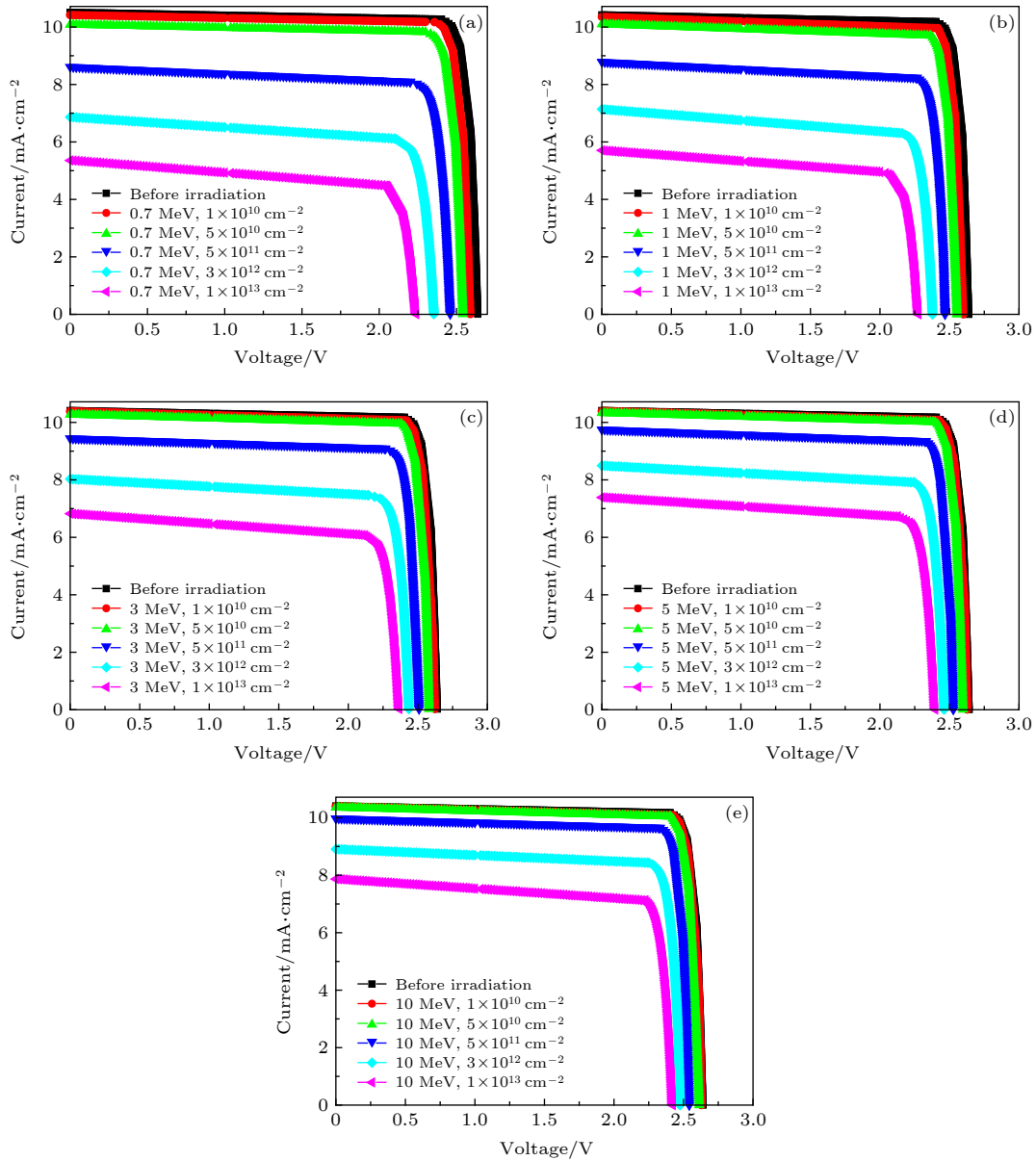


图 3 不同能量和注量的质子辐照后, GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池的 I - V 曲线 (a) 0.7 MeV; (b) 1 MeV; (c) 3 MeV; (d) 5 MeV; (e) 10 MeV

Fig. 3. Simulation results of I - V curves of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated by protons with different energy and fluence: (a) 0.7 MeV; (b) 1 MeV; (c) 3 MeV; (d) 5 MeV; (e) 10 MeV.

基区电流密度. 将 (8) 式代入 (9) 式, 可得子电池短路电流为:

$$J_{sc} = A [\exp(-\alpha(\lambda, x) x_j) [\exp(\alpha(\lambda, x) L_p) - \exp(-\alpha(\lambda, x) L_n)]], \quad (10)$$

其中 $A = q(1 - R) \int F(\lambda) d\lambda$, 耗尽区距离子电池上表面深度为 x_j , L_p 为 N 型发射区空穴扩散长度, L_n 为 P 型基区电子扩散长度. 质子辐照后, x_j 不会发生较大改变, 因此, 短路电流的退化主要源于少子扩散长度的减小. 少子扩散长度的减小, 使位于发射区顶部和基区底部的光生载流子难以扩散到

耗尽区被内建电场所收集, 导致大量光生载流子被质子辐照产生的能级缺陷复合, 从而导致子电池短路电流的减小, 进而诱发三结太阳能电池短路电流减小. 少子扩散长度与辐照注量关系如下 [24]:

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \phi, \quad (11)$$

式中 L_0 , L 分别为辐照前和辐照后的少子扩散长度, K_L 为少子扩散长度损伤系数. 由 (11) 式可知, 辐照后少子扩散长度随辐照注量的增加而减小. 而 K_L 随着质子能量的减小而逐渐增大, 导致少子

扩散长度退化幅度随质子能量的减小和辐照注量的增加而增大, 进而导致三结太阳能电池短路电流退化幅度随质子能量的减小和辐照注量的增加而增大.

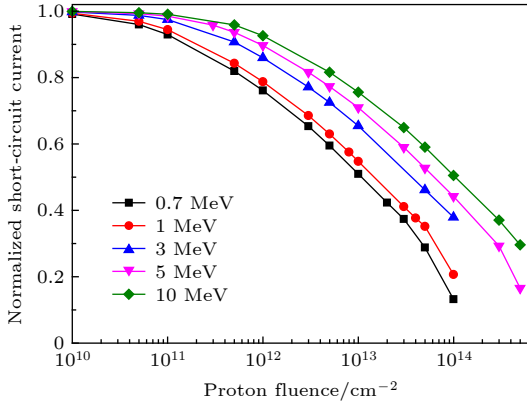


图 4 不同能量质子辐照下, 归一化短路电流随辐照注量变化的模拟结果

Fig. 4. Simulation results of normalized short-circuit current versus proton fluence for the GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated by different energy proton.

3.4 开路电压退化分析

不同能量质子辐照下, 三结太阳能电池归一化开路电压 (open-circuit voltage, V_{oc}) 随辐照注量变化的模拟结果如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 随着辐照注量的增加, 归一化开路电压退化幅度逐渐变大, 对于不同能量的质子辐照, 开路电压退化幅度随辐照能量的减小而增大, 这与质子辐照后短路电流的退化规律相同, 但相同辐照条件下, 开路电压的退化幅度小于短路电流的退化幅度. 当质子能量为 0.7 MeV, 辐照注量为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时, 开路电压衰减到初始值的 0.68, 而此时短路电流已经衰减到初始值的 0.13. 三结太阳能电池开路电压等于各子电池开路电压之和 [25], 因此, 质子辐照后, 子电池开路电压退化直接导致三结太阳能电池开路电压退化. 子电池开路电压与短路电流关系式为 [26]

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} + I_0}{I_0} \right) = \frac{nk_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right), \quad (12)$$

式中 J_0 为反向饱和电流密度. 从 (12) 式可以看出, 开路电压 V_{oc} 和短路电流 J_{sc} 的对数近似成正比, 因此导致开路电压退化幅度小于短路电流的退化幅度. 反向饱和电流密度表达式为 [27,28]:

$$J_0 = q \frac{n_i^2 D_p}{N_D L_p} + q \frac{n_i^2 D_n}{N_A L_n} + q \frac{n_i W_D}{\tau_D}, \quad (13)$$

(13) 式中, 等号右侧三项分别为 N 型发射区反向饱和电流密度, P 型基区反向饱和电流密度, 耗尽区反向饱和电流密度. 质子辐照诱发三结太阳能电池材料禁带中产生能级缺陷, 造成少子寿命和少子扩散长度的减小, 导致 (13) 式中反向饱和电流增加, 短路电流减小, 从而诱发开路电压的减小. 相同辐照注量下, 质子能量越小, 三结太阳能电池中产生的空位缺陷浓度越大. 因此, 三结太阳能电池开路电压的退化随质子辐照能量的减小而逐渐增大.

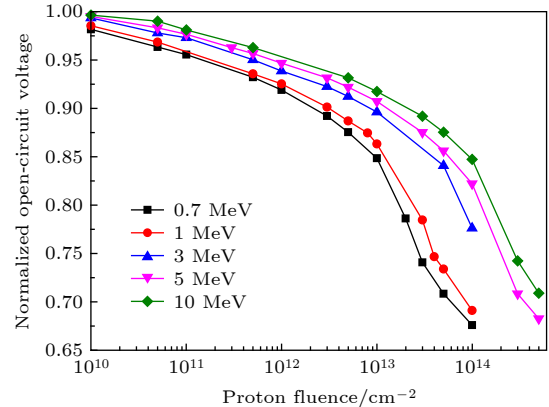


图 5 不同能量质子辐照下, 归一化开路电压随辐照注量变化的模拟结果

Fig. 5. Simulation results of normalized open-circuit voltage versus proton fluence for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated by different energy proton.

3.5 光谱响应退化分析

为进一步揭示质子辐照对三结太阳能电池性能产生的影响, 对不同能量质子辐照后, 三结太阳能电池外量子效率的变化情况进行分析. 三结太阳能电池外量子效率, 定义为三结太阳能电池对外输出电荷数与入射到三结太阳能电池表面光子数之比, 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. 固定辐照注量为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 不同能量质子辐照下, 顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 光谱响应模拟结果如图 6 所示. 图中未给出底电池 Ge 的光谱响应, 这是因为底电池 Ge 在质子辐照后仍有较大的输出电流, 不会影响三结太阳能电池输出电流 [29]. 从图 6 可以看出, 随着质子能量的减小, 顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 光谱响应的退化幅度逐渐增大. 质子辐照后产生的位移损伤缺陷充当少数载流子复合中心, 位移损伤缺陷浓度随质子能量的减小而逐渐增大, 缺陷浓度的增大导致光生载流子非辐射复合的增加, 使三结太阳能电池

对外输出电荷数减小, 进而诱发三结太阳能电池光谱响应的退化.

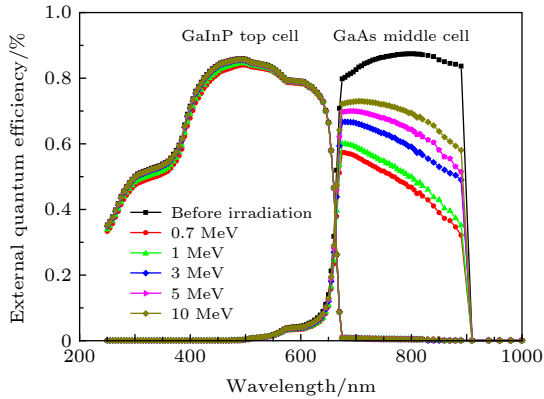


图 6 辐照注量为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 在不同能量质子辐照下的外量子效率

Fig. 6. Simulation results of external quantum efficiency of GaInP and GaAs sub-cells before and after different energy proton irradiation with the fluence of $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

此外, 从图 6 可见, 相同辐照条件下, 中电池 GaAs 光谱响应退化幅度远大于顶电池 GaInP 退化幅度. 因为质子辐照后, 顶电池 GaInP 空位缺陷 V_{In} 和 V_{P} 的迁移能分别为 0.26 和 1.2 eV. 中电池 GaAs 空位缺陷 V_{Ga} 和 V_{As} 的迁移能分别为 1.79 和 1.48 eV. 顶电池 GaInP 空位缺陷的迁移能远小于中电池 GaAs 空位缺陷的迁移能. 同时在室温下, InP 材料的辐照缺陷退火效应更明显 [26]. 由此可见, 中电池 GaAs 的抗辐照性能最差, 中电池抗辐照性能直接决定三结太阳能电池的抗辐照性能. 对中电池 GaAs 单独分析, 相同辐照条件下, 中电池光谱响应在不同波长退化幅度差别较大, 出现明显的短波效应和长波效应. 根据中电池在不同波长下光谱响应结果, 中电池光谱响应在 500—700 nm 短波范围内退化较小, 而在 700—900 nm 长波范围内退化较大. 光谱响应在不同波长的退化与电池不同结构的损伤有关. 500—700 nm 波长范围内光谱响应退化, 主要因为质子辐照减小了 N 型发射区少数载流子 (空穴) 扩散长度, 增加了空穴的非辐射复合. 而 700—900 nm 波长范围内光谱响应退化, 主要因为质子辐照在 P 型基区产生了位移损伤, 减小了 P 型基区少数载流子 (电子) 扩散长度. 由于中电池基区宽度 (2.5 μm) 远大于发射区 (0.1 μm) 宽度, 相比于发射区顶部少数载流子, 基区底部少数载流子更难以扩散到耗尽区. 根据三结太阳能电池工作原理, 三结太阳能电池对外输出电流主

要由两部分组成, 分别是发射区少数载流子 (空穴) 电流和基区少数载流子 (电子) 电流. 当受到太阳光照射, 太阳能电池将吸收光子, 使发射区少数载流子 (空穴) 和基区少数载流子 (电子) 被激发, 发射区空穴和基区电子扩散到耗尽区后, 被耗尽区形成的内建电场所分离, 进而对外产生电流. 因为中电池 GaAs 基区的厚度远大于发射区厚度, 在中电池 GaAs 吸收波长范围内, 太阳光谱中的大部分光子被中电池 GaAs 基区所吸收, 基区被激发的少数载流子数目更多, 所以子电池电流主要由基区少数载流子 (电子) 的电流组成. 中电池 GaAs 基区 (具体见图 1, 中电池 P-GaAs 基区的厚度为 2.5 μm) 电子电流随不同能量质子辐照后的退化结果如图 7 所示. 其中图 7(a) 为初始状态下, 中电池 GaAs 基

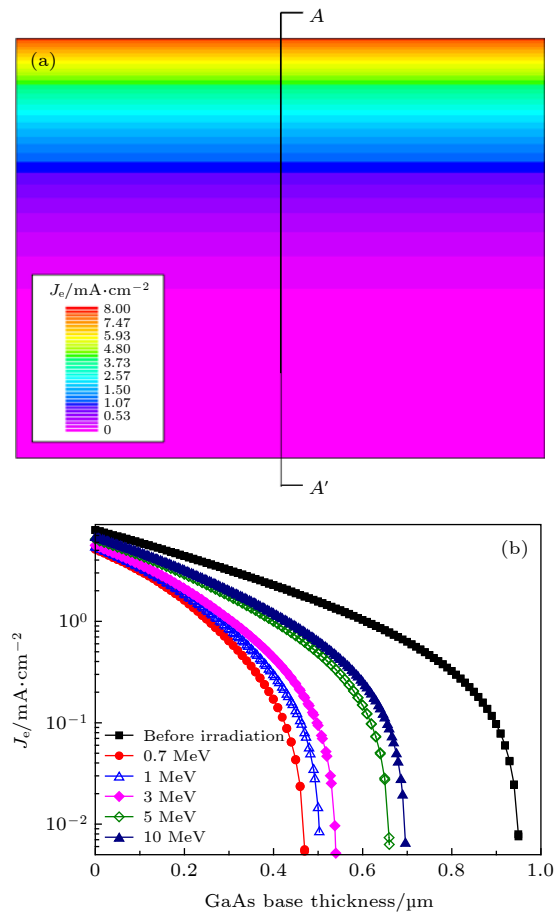


图 7 (a) 初始中电池 GaAs 的基区少数载流子 (电子) 电流 (J_e) 的模拟结果; (b) 不同能量质子辐照下, 沿 A-A' 切线的中电池 GaAs 基区电子电流密度随基区厚度的变化

Fig. 7. (a) Simulation results of current density (J_e) of minority carriers (electron) of GaAs middle cell base region before irradiation; (b) simulation results of current density of minority carriers (electron) versus base thickness for GaAs middle cell base region before and after different energy proton irradiation with the fluence of $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

区电子电流密度. 为直观分析基区电子电流密度变化结果, 沿 $A-A'$ 切线处的基区电子电流密度随中电池 GaAs 基区厚度的变化结果如图 7(b) 所示. 利用相同方法, 分别得到辐照注量为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 不同能量质子辐照下基区电子电流密度随中电池 GaAs 基区厚度的变化结果. 当基区厚度大于 $1 \mu\text{m}$ 时, 基区电子电流密度接近为 0, 因此图 7(b) 中未画出 $1-2.5 \mu\text{m}$ 的电子电流密度. 其中图 7(b) 中 X 轴零点位置, 对应于中电池 GaAs 基区上表面. 相同辐照注量下, 位移损伤浓度随质子能量的减小而增大, 导致少数载流子非辐射复合随质子能量的减小而增加, 从而诱发中电池 GaAs 基区电子电流密度随质子能量的减小而减小. 同时可以看到, 电子电流减小到零时所对应的基区厚度随质子能量的减小逐渐减小. 只有基区厚度与耗尽区的距离小于电子扩散长度时, 才能产生电流, 而当基区厚度与耗尽区的距离大于电子扩散长度时, 则不能产生电流. 电子电流减小到零时的基区厚度反映了基区少数载流子的扩散长度. 质子辐照后, 少数载流子扩散长度的退化随质子能量的减小而逐渐增大, 从而导致基区电子电流减小到零时所对应的基区厚度随质子能量的减小而逐渐减小.

3.6 最大输出功率退化分析

三结太阳能电池最大输出功率表示三结太阳能电池对外输出功率最大值, 是三结太阳能电池最重要的性能参数. 不同辐照能量下, 归一化最大输出功率随辐照注量变化的模拟结果如图 8 所示. 从图 8 可见, 对于不同能量的质子辐照, 最大输出功率退化幅度随辐照能量的减小而增大. 因为在三结太阳能电池中, 中电池 GaAs 抗辐照性能最差, 三结太阳能电池性能退化主要由中电池性能退化决定, 所以用中电池的位移损伤剂量等效三结太阳能电池位移损伤剂量的变化结果如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 最大输出功率随位移损伤剂量的增加逐渐减小, 利用方程^[30]及最大输出功率退化的模拟结果, 拟合得到归一化最大功率随位移损伤剂量的特征方程:

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

其中 C 为 0.13, D_0 为 $4.53 \times 10^9 \text{ MeV/g}$, 由 (14) 式可知, 当 $D < D_0$ 时, 质子辐照对三结太阳能电池影响较小; 当 $D > D_0$ 时, 质子辐照对三结太阳能电池

影响较大, 最大输出功率的退化与位移损伤剂量的对数近似成正比. 当质子能量较高, 足够穿透中电池 GaAs 后, 在器件敏感区域内产生的缺陷近似为均匀分布, 此时只需要确定质子辐照条件下的位移损伤剂量, 利用此物理方程, 可以获得该辐照条件下三结太阳能电池最大输出功率退化结果, 实现三结太阳能电池质子辐照后最大输出功率退化的预估.

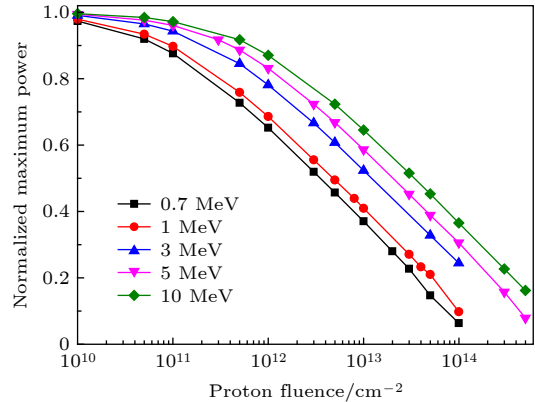


图 8 不同能量质子辐照下, 三结太阳能电池最大输出功率随辐照注量的退化结果

Fig. 8. Simulation results of normalized maximum power versus proton fluence for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated by different energy proton.

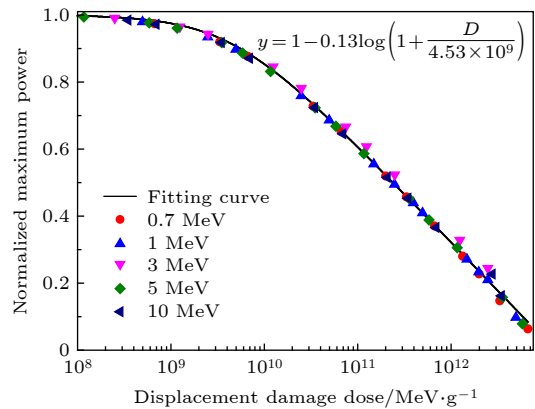


图 9 三结太阳能电池最大输出功率随位移损伤剂量的退化结果

Fig. 9. Degradation of normalized maximum power versus displacement damage dose for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells.

4 结 论

本文以 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池为研究对象, 开展了能量为 0.7, 1, 3, 5, 10 MeV 质子辐照损伤模拟研究, 分析了三结太阳能电池短路电流、开路电压、最大功率、光谱响应随质子能量的

退化机理, 利用不同辐照条件下三结太阳能电池最大输出功率退化结果, 拟合得到了三结太阳能电池归一化最大输出功率随位移损伤剂量变化的物理方程. 研究表明, 质子辐照会在三结太阳能电池中引入位移损伤缺陷, 使得少数载流子扩散长度退化幅度随质子能量的减小而增大, 从而导致三结太阳能电池短路电流、开路电压、最大输出功率的退化随质子能量的减小而增大. 同时, 在相同辐照条件下开路电压的退化幅度小于短路电流退化幅度. 根据外量子效率模拟结果, 在相同质子辐照条件下, 中电池 GaAs 外量子效率的退化远大于顶电池 GaInP 外量子效率的退化, 同时中电池在长波范围内的退化幅度比短波范围更大. 中电池外量子效率在长波范围的退化与中电池基区损伤有关, 质子辐照主要导致中电池 GaAs 基区中产生严重的辐照损伤, 从而诱发三结太阳能电池短路电流、开路电压、最大输出功率的退化.

参考文献

- [1] Zhang Z W, Lu J F, Chi W Y, Wang L X, Chen M B 2003 *Aerospace Shanghai* **03** 33 (in Chinese) [张忠卫, 陆剑峰, 池卫英, 王亮兴, 陈鸣波 2003 *上海航天* **03** 33]
- [2] Jones P A, Spence B R 2011 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **26** 17
- [3] Lohmeyer W Q, Cahoy K 2013 *Space Weather* **11** 476
- [4] Zainud-Deen S H, Dawoud M, Malhat E A, Aboul-Dahab M A 2019 *Wirel. Pers. Commun.* **1** 9
- [5] Campesato R, Baur C, Casale M, Gervasi M, Gombia E, Greco E, Kingma A, Rancoita P G, Rozza D, Tacconi M 2018 arXiv: 1809. 07157 [physics. ins-det]
- [6] Zhang Y Q 2017 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [张延清 2017 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [7] Wu Y Y, Yue L, Hu J M, Lan M J, Xiao J D, Yang D Z, He S Y, Zhang Z W, Wang X C, Qian Y, Chen M B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098110 (in Chinese) [吴宜勇, 岳龙, 胡建民, 蓝慕杰, 肖景东, 杨德庄, 何世禹, 张忠卫, 王训春, 钱勇, 陈鸣波 2011 *物理学报* **60** 098110]
- [8] Wu R, Wang J L, Yan G, Wang R 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 046101
- [9] Qi J H, Hu J M, Sheng Y H, Wu Y Y, Xu J W, Wang Y Y, Yang X M, Zhang Z R, Zhou Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 108802 (in Chinese) [齐佳红, 胡建民, 盛延辉, 吴宜勇, 徐建文, 王月媛, 杨晓明, 张子锐, 周扬 2015 *物理学报* **64** 108802]
- [10] Bi Z, Zhang J C, Lv L, Hao Y 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 1492
- [11] Guo H L, Shi L F, Wu Y Y, Sun Q, Yu H, Xiao J D, Guo B 2018 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **431** 1
- [12] Wang R, Lu M, Yi T C, Yang K, Ji X X 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 103
- [13] Elahidoost A, Fathipour M, Mojab A 2012 *20th Iranian Conference on Electrical Engineering* Tehran, Iran, May 15–17, 2012 p113
- [14] Yan Y Y, Fang M H, Tang X B, Chen F D, Huang H, Sun X Y, Ji L L 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **451** 49
- [15] Liu Y M, Sun Y, Rockett A 2012 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **98** 124
- [16] Shi M 2003 *Semiconductor Devices Physics and Technology* (Suzhou: Suzhou University Press) p522 (in Chinese) (in Chinese) [施敏 2003 *半导体器件物理与工艺* (苏州: 苏州大学出版社) 第522页]
- [17] Wang R, Guo Z L, Zhang X H, Zhai Z X 2003 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **77** 351
- [18] Khan A, Yamaguchi M, Dharmaso N, Bourgoin J, Ando K, Takamoto T 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 1241
- [19] Dharmarasu N, Yamaguchi M, Bourgoin J C, Takamoto T, Ohshima T, Itoh H, Imaizumi M, Matsuda S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 64
- [20] Li S S, Loo R Y 1991 *Solar Cells* **31** 349
- [21] Zhu M F, Xiong S Z 2014 *Foundation and Application of Solar Cells* (Vol. 1) (Beijing: Science Press) p110 (in Chinese) [朱美芳, 熊绍珍 2014 *太阳能电池基础与应用 (上卷)* (北京: 科学出版社) 第110页]
- [22] Silvaco Atlas User' s Manual <http://www.silvaco.com.cn> [2019-10-20]
- [23] Lu M, Wang R, Liu Y H, Hu W T, Feng Z, Han Z L 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **269** 1884
- [24] Wang Z J, Tang B Q, Xiao Z G, Liu M B, Huang S Y, Zhang Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4136 (in Chinese) [王祖军, 唐本奇, 肖志刚, 刘敏波, 黄绍艳, 张勇 2010 *物理学报* **59** 4136]
- [25] Sato S, Miyamoto H, Imaizumi M, Shimazaki K, Morioka C, Kawano K, Ohshima T 2009 *Sol Energy Mater. Sol. Cells* **93** 768
- [26] Hu J M, Wu Y Y, Qian Y, Yang D Z, Yang S Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5051 (in Chinese) [胡建民, 吴宜勇, 钱勇, 杨德庄, 何世禹 2009 *物理学报* **58** 5051]
- [27] Norde H 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 5052
- [28] Herlufsen S, Schmidt J, Hinken D, Bothe K, Boendel R 2008 *Phys. Status Solidi* **2** 245
- [29] Chang X Y, Yao S, Zhang Q L, Zhang Y, Wu B, Zhan R, Yang C B Wang Z Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 108801 (in Chinese) [常晓阳, 尧舜, 张奇灵, 张杨, 吴波, 占荣, 杨翠柏, 王智勇 2016 *物理学报* **65** 108801]
- [30] Anspaugh B E 1996 *GaAs Solar Cell Radiation Handbook* (Pasadena: Jet Propulsion Laboratory Publication) p5

Modeling and simulating of radiation effects on the performance degradation of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells induced by different energy protons*

Li Jun-Wei¹⁾ Wang Zu-Jun^{2)†} Shi Cheng-Ying¹⁾ Xue Yuan-Yuan^{2)‡}
Ning Hao³⁾ Xu Rui³⁾ Jiao Qian-Li³⁾ Jia Tong-Xuan³⁾

1) (*Xi'an Research Institute of High-Technology, Xi'an 710025, China*)

2) (*State Key Laboratory of Intense Pulsed Irradiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

3) (*School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

(Received 11 December 2019; revised manuscript received 7 January 2020)

Abstract

The GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells have been widely used for spacecraft energy sources because of their simple manufacturing process, stable structures, high conversion efficiency, and low cost. The performances of the GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells show a remarkable degradation after space proton irradiation. At present, the experimental researches of proton irradiation of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells with different energy and fluence have been carried out. However, the experimental researches can analyze the proton radiation damage only under the specific energy and fluence, but cannot analyze the proton radiation damage under the complete space energy spectrum. The numerical simulation of triple-junction solar cells can be used to accurately analyze the degradation of major parameters under different energy proton irradiations which cannot be achieved experimentally.

In this paper, the modeling of degradation for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells, induced by proton irradiation with different energy is studied by numerical simulation. The energy values include 0.7 MeV, 1 MeV, 3 MeV, 5 MeV, and 10 MeV. The structure of GaInP/GaAs/Ge model and proton irradiation-induced defect model with different energy and fluence are established. The I - V curves and spectral response curves under different proton irradiation conditions are obtained. The simulation results are in good agreement with the experimental results. The degradation of major parameters of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells, caused by different energy and fluence proton irradiations, is studied, these parameters being the short circuit current, open circuit voltage, minority carrier lifetime, electron current density, external quantum efficiency, and maximum power. The degradation curve of the maximum power with displacement damage dose is obtained by fitting the degradation simulation results under different proton irradiation conditions. Displacement damage defects induced by protons are introduced into triple-junction solar cells, which lead the minority carrier diffusion length to degrade. The degradation increases with the proton energy decreasing. In the meanwhile, it will lead the related electrical parameters to degrade, which increases with the proton energy

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11875223, 11805155), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. XDA15015000), the State Key Laboratory of Intense Pulsed Irradiation Simulation and Effect, China (Grant Nos. SKLIPR1803, 1903Z), and the Innovation Foundation of Radiation Application, China (Grant No. KFZC2018040201).

† Corresponding author. E-mail: wangzujun@nint.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xueyuanyuan@nint.ac.cn

decreasing. The simulation results show that related electrical parameters decrease with the proton irradiation fluence increasing. Under the same proton irradiation condition, the external quantum efficiency degradation of GaAs sub-cell is larger than that of GaInP sub-cell because the irradiation resistance of GaAs is poor. Among the degradations of spectral response of GaAs sub-cell at different wavelengths, the degradation in the long wave is greater than that in the short wave. It is found that the degradations of GaAs sub-cell related electrical parameters are mainly due to the damage to the base region.

Keywords: GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells, irradiation-induced defects, proton irradiation model, numerical simulation

PACS: 88.40.hj, 81.40.Wx, 07.89.+b, 78.55.Cr

DOI: [10.7498/aps.69.20191878](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191878)