

## 钙钛矿太阳能电池辐照实验研究\*

李培<sup>1)†</sup> 徐洁<sup>2)</sup> 贺朝会<sup>1)</sup> 刘佳欣<sup>1)</sup>

1) (西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049)

2) (西安建筑科技大学理学院, 西安 710055)

(2023 年 2 月 17 日收到; 2023 年 3 月 25 日收到修改稿)

太阳能电池作为航天器的重要能源, 其空间抗辐射性能具有重要的研究意义. 钙钛矿太阳能电池因其较长的载流子寿命、较高的光吸收性能、高载流子迁移率以及成本低和易于制备等优势成为太阳能电池研究的前沿和热点. 近年来, 钙钛矿太阳能电池的光电转换效率已逐渐提升至 25.5%, 在各个领域逐渐走向实际应用, 并将有可能应用于航天器的电源系统. 目前, 钙钛矿太阳能电池的空间辐照效应研究较为分散, 实验样品来自不同的制备工艺, 不同器件结构和组分比例会导致实验结果的差异. 本文基于自主研制的钙钛矿太阳能电池样品分别开展了质子、电子以及 $\gamma$ 辐照实验研究, 通过分析辐照前后的光电特性预测其辐射效应规律, 为钙钛矿太阳能电池的空间应用提供实验依据.

**关键词:** 钙钛矿太阳能电池, 辐照实验, 质子, 电子,  $\gamma$  辐照**PACS:** 61.82.-d, 61.80.Fe, 61.80.Ed, 61.80.Hg**DOI:** 10.7498/aps.72.20230230

## 1 引言

相比于硅太阳能电池, 有机无机杂化的钙钛矿太阳能电池 (perovskite solar cells, PSCs) 具有成本低廉、制备简单以及优异光电性能等优点<sup>[1-5]</sup>. 2009 年, Kojima 等<sup>[6]</sup>首次制备并报道了钙钛矿太阳能电池, 将  $[\text{CH}_3\text{NH}_3]\text{PbX}_3$  ( $X = \text{Br}, \text{I}$ ) 作为钙钛矿吸光层应用在钙钛矿光伏器件中. 自此之后的十几年内, 钙钛矿光伏器件的光电转换效率从 3.81% 跳跃式地增长至 25.5%, 成为最有可能替代传统能源的技术之一<sup>[7]</sup>. 在空间应用领域, 太阳能电池是航天器的能量之源, 其高可靠性是制约以空间站为代表的长寿命航天器的瓶颈问题. 目前, 传统硅基和砷化镓基多结太阳能电池的效率逐渐走向极限, 研究表明空间辐射会导致这些太阳能电池性能下降, 寿命缩短, 严重影响航天器的可靠性和寿命<sup>[8-12]</sup>. 因此, 亟待寻求一种光电转换高效、性能稳定、价格低廉且抗辐照性能优良的太阳

能电池.

钙钛矿薄膜表面呈亲水状态, 其寿命受限于空气中的氧气和水分, 但空间环境大气非常稀薄, 一定程度提升了 PSCs 的湿度稳定性<sup>[13-15]</sup>. 大量研究表明, 与硅基和 III-V 族化合物电池相比, PSCs 表现出更加优异的空间抗辐射能力. 2016 年, 德国 Lang 等<sup>[16]</sup>研究了  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  太阳能电池的高能质子辐照效应, 结果表明质子辐照 PSCs 后会发生自愈, 其质子辐照损伤阈值高于晶体硅太阳能电池近 3 个数量级. 随后的一些质子能量为 50 keV, 100 keV 和 68 MeV 的辐照都表明 PSCs 都具有较强的抗质子辐照能力<sup>[17-19]</sup>. 2018 年, Miyazawa 等<sup>[20]</sup>研究表明 PSCs 的抗电子辐照水平高于晶体硅、砷化镓和磷化铟镓/砷化镓太阳能电池. 2019 年, Yang 等<sup>[21]</sup>的研究表明钙钛矿层在 $\gamma$ 射线持续照射 1535 h 后, 仍然保持 96.8% 的初始功率转换效率, 相比较之下, 玻璃基板的性能出现了较大退化, 这是因为钙钛矿本身的自愈行为修复了 $\gamma$ 射线造成的缺陷.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12005159) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [lipei0916@xjtu.edu.cn](mailto:lipei0916@xjtu.edu.cn)

上述研究表明,不同辐照条件下钙钛矿太阳能电池的辐射响应不同.此外,以往研究使用的样品来自不同的制备工艺,不同器件结构和组分比例也会导致实验结果的差异.因此,有必要针对相同工艺的钙钛矿太阳能电池系统开展其辐照实验研究,前期工作已经针对电池样品开展了质子和电子辐照实验及分析<sup>[22]</sup>,本文则基于该钙钛矿太阳能电池样品系统阐述了质子、电子以及 $\gamma$ 辐照实验研究,通过分析辐照前后的电学特性变化揭示太阳能电池的效应规律,为钙钛矿太阳能电池的空间应用提供实验依据.

## 2 实验设置

### 2.1 实验样品

钙钛矿太阳能电池样品的结构主要包括5个部分,分别是ITO导电玻璃、电子传输层( $\text{SnO}_2$ )、钙钛矿吸光层( $\text{FACsPbI}_3$ )、空穴传输层(Spiro)以及Au电极.其中,ITO是在二氧化硅玻璃基底上,利用溅射、蒸发等多种方法镀上一层氧化铟锡膜,俗称ITO.吸光层材料通常为三维有机-无机复合钙钛矿材料,化学式为 $\text{ABX}_3$ ,其中A为 $\text{MA}^+(\text{CH}_3\text{NH}_3^+)$ , $\text{FA}^+(\text{NH}_2)_2\text{CH}^+$ , $\text{Cs}^+$ 等一价阳离子,B为 $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Sn}^{2+}$ , $\text{Ge}^{2+}$ 等二价金属阳离子,X为 $\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-$ , $\text{I}^-$ 等一价卤素阴离子.图1所示为采用扫描电子显微镜(SEM)表征的钙钛矿太阳能电池的截面结构图,其基本结构为Glass/ITO/ $\text{SnO}_2$ / $\text{FACsPbI}_3$ /Spiro/Au,每个单独器件的有效面积为 $0.07\text{ cm}^2$ .

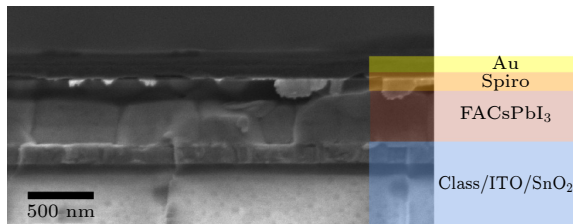


图1 钙钛矿太阳能电池电子显微镜扫描截面示意图  
Fig. 1. Cross-sectional SEM image of perovskite solar cell.

当太阳光照射时,钙钛矿吸光层首先吸收光子并产生电子-空穴对,由于钙钛矿材料具有较低的载流子复合概率和较高的载流子迁移率,这些未复合的载流子分别被电子传输层和空穴传输层收集,即电子从钙钛矿层传输到 $\text{SnO}_2$ 层,最后被ITO收集;空穴从钙钛矿层传输到Spiro-OMeTAD层,最后被金属电极收集.

### 2.2 实验方法

采用离位测试方法分别开展了钙钛矿太阳能电池的质子、电子、中子以及 $\gamma$ 辐照实验.目前,国外钙钛矿太阳能电池质子辐照研究主要集中在高能质子(68 MeV)<sup>[14,21]</sup>和低能质子(50 keV)<sup>[16]</sup>,研究表明在上述能量的质子辐照下钙钛矿太阳能电池均具有一定的抗辐照性.然而,68 MeV质子能量较高而快速穿出器件材料,能量为50 keV的质子则难以均匀地穿过器件的每一层.因此,本文质子辐照实验选取3 MeV能量进行辐照实验,注量率为 $1.0 \times 10^8\text{ cm}^{-2}/\text{s}$ ,累积注量点分别为 $1.0 \times 10^{11}$ , $1.0 \times 10^{12}$ , $1.0 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$ .对于电子辐照实验,电子能量为1 MeV,注量率为 $1.0 \times 10^{11}\text{ cm}^{-2}/\text{s}$ ,累积注量分别为 $1.0 \times 10^{14}$ , $1.0 \times 10^{15}$ , $1.0 \times 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ ;对于 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 辐照试验,剂量率为98 rad/s(Si),剂量点分别为100 krad(Si),300 krad(Si),500 krad(Si),800 krad(Si),1000 krad(Si).辐照过程中一次性将所有太阳能电池样品进行辐照,每到辐照注量或剂量点,取出相应样品并在24 h内测试电学特性,其他样品继续辐照直至相应辐照注量或剂量点.

为表征辐照前后钙钛矿太阳能电池特性的变化,在AM1.5标准太阳光辐照下给电池的两极加偏压,逐渐改变偏压测试得到对应的电流-电压伏安特性曲线.其中,评估太阳能电池的4个重要参数包括开路电压(open-circuit voltage,  $V_{\text{OC}}$ )、短路电流(short circuit current,  $J_{\text{SC}}$ )、填充因子(fill factor, FF)和光电转化效率(power conversion efficiency, PCE),各参数与 $J$ - $V$ 曲线关系如图2所示,其中 $J_{\text{mp}}$ 是 $J$ - $V$ 曲线处对应最大输出功率 $P_{\text{max}}$ 的电流密度, $V_{\text{mp}}$ 是 $J$ - $V$ 曲线处对应 $P_{\text{max}}$ 的电压, $P_{\text{in}}$ 是

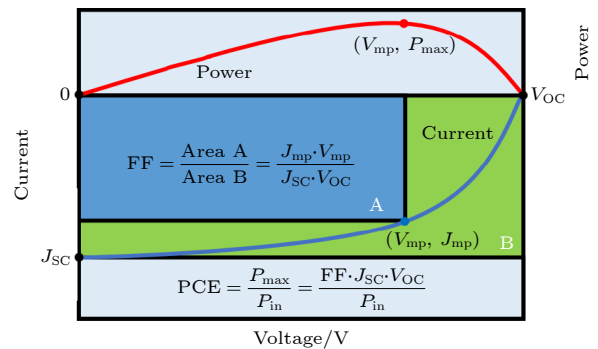


图2 太阳能电池 $J$ - $V$ 曲线相关的电性能参数

Fig. 2. Parameters of electrical performance associated with  $J$ - $V$  curves of solar cells.

太阳光入射功率. 通过比较不同辐照条件下太阳能电池的各光电转换性能参数的变化情况, 研究辐照类型、注量以及剂量对电池的光电转换性能的影响.

### 3 辐照实验结果

#### 3.1 伏安特性曲线分析

太阳能电池伏安特性曲线 ( $J-V$  特性曲线) 可以通过在电池的两极接上偏压作为负载, 在标准太阳光辐照下, 随着偏压的变化驱动电池对外做功, 测试得到对应的电流-电压伏安特性曲线, 能够直观、有效地体现太阳能电池的光电转换性能. 钙钛矿材料对于温度很敏感, 随着温度变化会形成不同光电性能的晶型, 当光照导致温度过高时有机材料会发生分解, 并且吸光层材料  $\text{MAPbI}_3$  也会与水分子作用形成水合产物并分解为  $\text{MAI}$ ,  $\text{PbI}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ . 图 3 所示为未经辐照的对照组和辐照前在实验室测试的  $J-V$  特性曲线对比情况, 可以看出辐照对照组和实验室测试得到的  $J-V$  特性曲线相差并不大, 短路电流和开路电压基本不变, 器件因辐照发生的性能退化远远超过了器件自身发生的性能退化.

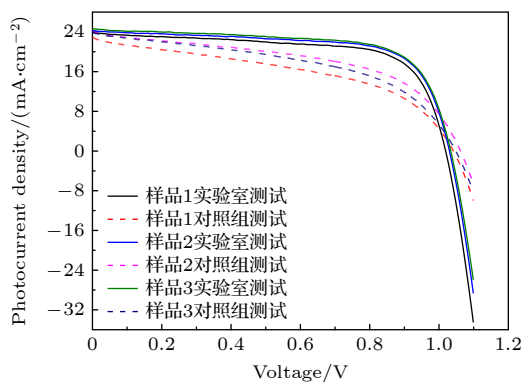


图 3 钙钛矿太阳能电池样品稳定性测试  
Fig. 3. Stability test of perovskite solar cells.

图 4 所示为钙钛矿太阳能电池  $J-V$  特性曲线随不同辐照条件的变化情况, 首先可看出在图 4(a) (质子辐照)、图 4(b) (电子辐照) 以及图 4(c) ( $\gamma$  辐照) 中命名为 pre 的未经辐照的  $J-V$  特性曲线一致性并不好, 这是由于钙钛矿太阳能电池样品间差异及其低稳定性导致的. 图 4(a) 是能量为 3 MeV 质子辐照下, 钙钛矿太阳能电池  $J-V$  特性曲线随质子注量的变化, 可以看出随着质子注量的增大, 短路电流和开路电压都有所变化, 但与辐照前相比差异

不大, 基本都在 22—25 mA 的电流范围和 1.0—1.02 V 的电压范围内. 本文钙钛矿太阳能电池的质子辐照实验结果与其他文献中报道的基本一致, 即钙钛矿太阳能电池具备一定的抗质子辐照的能力. 图 4(b) 和图 4(c) 分别是 1 MeV 电子和剂量率为 98 rad/s (Si) 的  $\gamma$  辐照条件下,  $J-V$  特性曲线随辐照电子注量和  $\gamma$  剂量的变化. 可以看出, 随着注量或剂量的累积, 钙钛矿太阳能电池的  $J-V$  特性曲线出现了明显的退化. 其中, 电子辐照  $J-V$  特性曲线发生了严重的变形, 器件特性几乎失效, 短路电流仅为初始的 50%, 开路电压降至 0.9 V. 随着

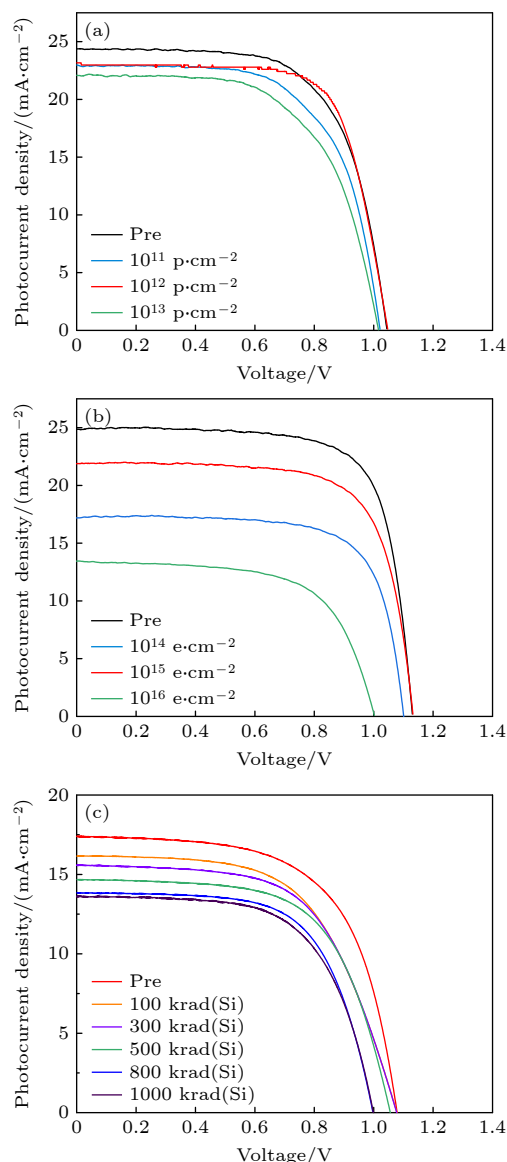


图 4 钙钛矿太阳能电池  $J-V$  特性曲线随不同辐照条件的变化 (a) 质子辐照; (b) 电子辐照; (c)  $\gamma$  辐照

Fig. 4. Variation of  $J-V$  characteristics of perovskite solar cells with different irradiation conditions: (a) Proton irradiation; (b) electron irradiation; (c)  $\gamma$  irradiation.

$\gamma$  累积剂量的增加, 电池的开路电压变化较为稳定, 短路电流则逐渐减小, 表现出显著的辐射敏感性. 本文开展的钙钛矿太阳能电池电子和  $\gamma$  辐照实验结果与文献 [21] 报道的结果较为一致, 即 PCS 对电子和  $\gamma$  辐照较为敏感.

### 3.2 短路电流分析

电池两极的功函数存在一定的差值, 当电池短路时, 电池内部的内建电场会使光生载流子分离而形成短路电流. 在 AM1.5 标准太阳光辐照下, 太阳能电池在外加偏压为零时的最大输出电流,  $J-V$  特性曲线对应的纵截距即为短路电流  $J_{SC}$ . 短路电流和光生电流密切相关, 光生电流的增大意味着太阳能电池具有良好的光电性能. 图 5 所示是不同辐照条件下短路电流随质子、电子辐照注量以及  $\gamma$  辐照剂量的变化. 可以看出钙钛矿太阳能电池辐照前短路电流随注量或剂量的变化较小, 随之注量和剂量的累积, 短路电流逐渐减小. 其中, 质子辐照注量增大引起的短路电流较小, 电子注量和  $\gamma$  剂量增大引起的短路电流减小较为明显, 进一步说明了钙钛矿太阳能电池的光电性能对电子和伽马辐照较为敏感, 对质子则具有较好的抗辐照能力.

### 3.3 光电转化效率分析

太阳能电池光电转化效率是衡量太阳能电池光能转换能力的重要参数. 如图 2 所示的计算方法, 其值为最大输出功率与入射功率的比值, 较高的 PCE 需要 FF,  $J_{SC}$  以及  $V_{OC}$  三个参数同时较高, 因此 PCE 是太阳能电池综合性能的体现. 图 6 所示为不同辐照条件下电池光电转换效率随质子、电子辐照注量以及  $\gamma$  辐照剂量的变化. 对于质子辐照 (图 6(a)), 辐照后的电池效率降低至辐照前的 94%, 随着质子注量的增加, PCE 的退化并没有明显增加. 如图 6(b) 所示, 电子辐照下 PCE 退化较为显著, 在电子注量为  $1 \times 10^{14}$  p/cm<sup>2</sup> 时, 转化效率降至初始值的 57%, 并且 PCE 的退化随着电子注量的累积而逐渐加剧. 图 6(c) 是电池转化效率随  $\gamma$  辐照剂量的变化, 可以看出电子辐照实验样品的初始 PCE 较低, 这是由于电池在储运或实验过程中可能保存不当, 其稳定性受到了空气和水的影响. 但从图 6(c) 可以看出, 随着  $\gamma$  辐照剂量的累积, 电池转化效率退化加剧, 当  $\gamma$  辐照剂量累积至 1000 krad(Si) 时, 其 PCE 降至初始值的 75%.

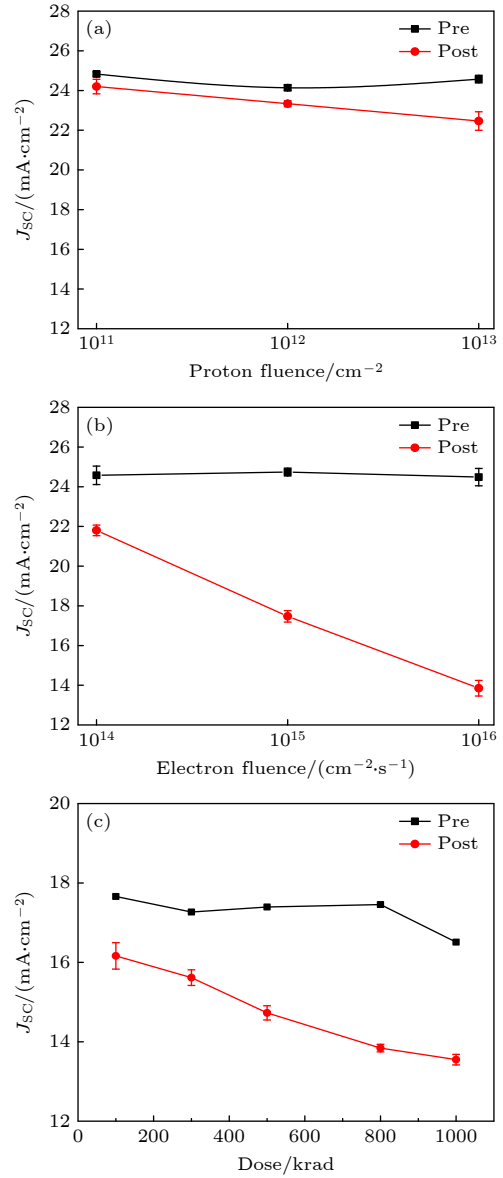


图 5 钙钛矿太阳能电池短路电流随不同辐照条件的变化 (a) 质子辐照; (b) 电子辐照; (c)  $\gamma$  辐照

Fig. 5. Variation of  $J_{SC}$  characteristics of perovskite solar cells with different irradiation conditions: (a) Proton irradiation; (b) electron irradiation; (c) gamma irradiation.

## 4 分析与讨论

研究表明, 根据实验数据建立半经验公式可以拟合出钙钛矿太阳能电池辐射敏感参数 (短路电流  $J_{SC}$ 、开路电压  $V_{OC}$ 、最大输出功率  $P_{max}$ ) 随辐照注量的变化曲线 [23], 如 (1) 式所示:

$$\frac{A(\varphi)}{A_0} = 1 - C \cdot \log \left[ 1 + \frac{\varphi}{\varphi_x} \right] \quad (1)$$

其中,  $A$  为辐射通量为  $\varphi$  的条件下辐射敏感参数值,  $A_0$  为辐照前敏感参数初值,  $C$  和  $\varphi_x$  是拟合系数.



将 (1) 式与图 4—6 中的实验数据进行拟合, 表 1 所示是不同辐射环境下各敏感参数半经验公式的拟合系数.

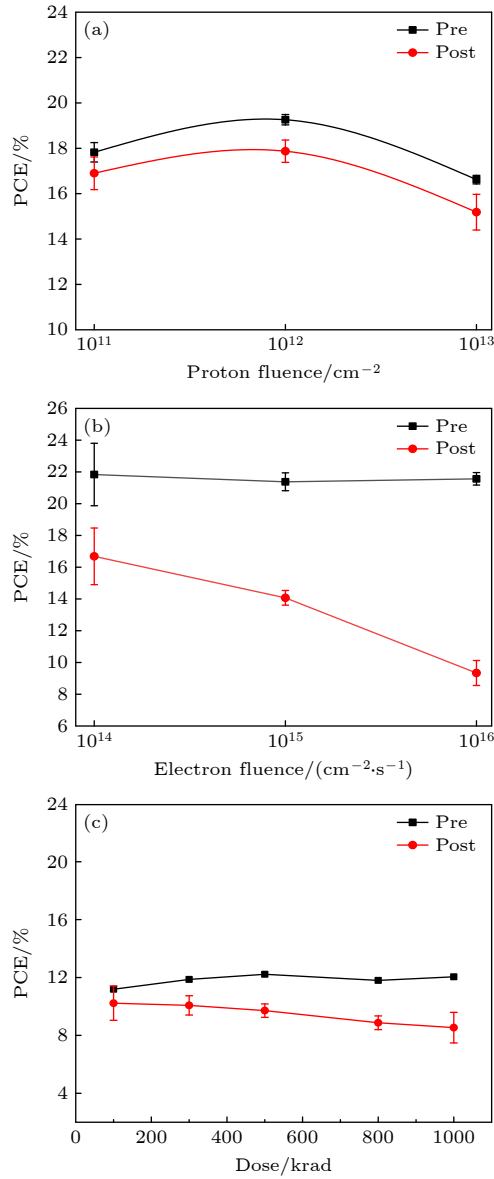


图 6 钙钛矿太阳能电池转化效率随不同辐照条件的变化 (a) 质子辐照; (b) 电子辐照; (c)  $\gamma$  辐照

Fig. 6. Variation of PCE characteristics of perovskite solar cells with different irradiation conditions: (a) Proton irradiation; (b) electron irradiation; (c) gamma irradiation.

需要注意的是,  $\gamma$  辐照导致的器件位移损伤主要由其产生的二次电子引发原子位移而形成.  $\gamma$  射线通过康普顿散射、光电效应等物理机制与材料相互作用, 产生能谱范围在 0—1.25 MeV 内的二次电子, 二次电子通过库仑相互作用在目标材料的晶格上产生原子位移, 从而对钙钛矿太阳能电池造成辐射损伤. 因此, 本文基于蒙特卡罗模拟软件 Geant4

表 1 不同辐射环境下钙钛矿太阳能电池各敏感参数半经验公式的拟合系数

Table 1. Fitting coefficients of semi empirical formulas for sensitive parameters of perovskite solar cells under different radiation environments.

|           | 质子辐照  | 电子辐照  | $\gamma$ 辐照                                       |
|-----------|---|---|---|
| $V_{OC}$  | $C = 0.041,$<br>$\varphi_x = 5.55 \times 10^{14}$ | $C = 0.015,$<br>$\varphi_x = 2.81 \times 10^{13}$ | $C = 0.001,$<br>$\varphi_x = 2.95 \times 10^9$    |
| $J_{SC}$  | $C = 0.052,$<br>$\varphi_x = 5.67 \times 10^{13}$ | $C = 0.048,$<br>$\varphi_x = 6.35 \times 10^{11}$ | $C = 0.013,$<br>$\varphi_x = 3.81 \times 10^{10}$ |
| $P_{max}$ | $C = 0.086,$<br>$\varphi_x = 9.66 \times 10^{13}$ | $C = 0.091,$<br>$\varphi_x = 1.65 \times 10^{12}$ | $C = 0.007,$<br>$\varphi_x = 4.63 \times 10^7$    |

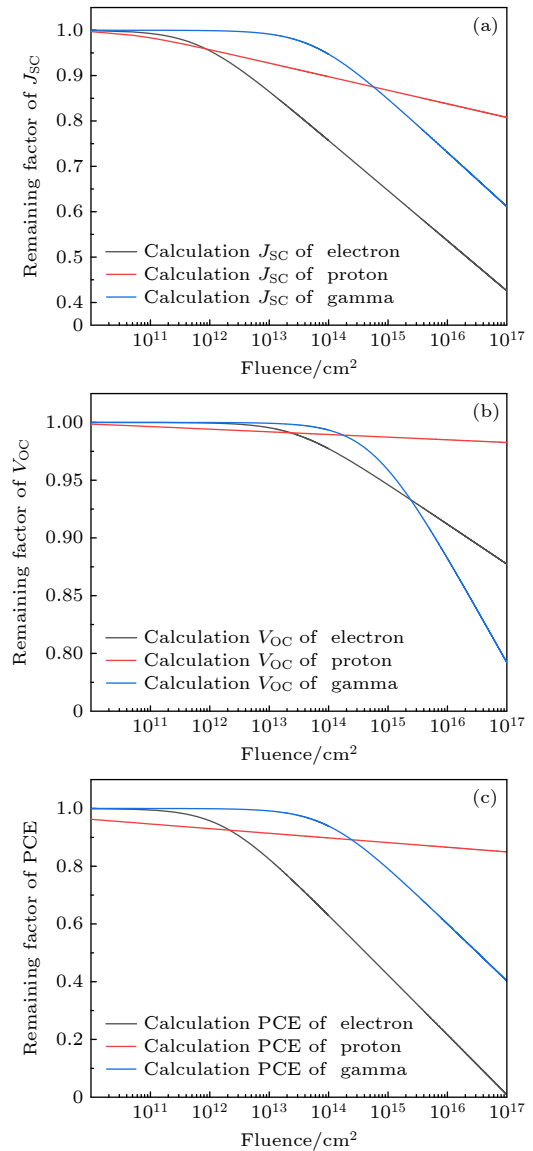


图 7 不同辐照条件下钙钛矿太阳能电池电学特性退化随辐照注量的变化 (a) 短路电流; (b) 开路电压; (c) 光电转化效率

Fig. 7. Degradation of PSCs under different irradiation conditions varies with the radiation fluence: (a)  $J_{SC}$ ; (b)  $V_{OC}$ ; (c) PCE.

开展钙钛矿太阳能电池的 $\gamma$ 辐照粒子输运模拟, 统计 $\gamma$ 二次电子的注量作为相应总剂量的辐射注量. 模型结构与图 1 所示的钙钛矿太阳能电池结构一致, 模拟所用粒子源为一个长和宽均为 200 nm 的面源, 源发射粒子方向为  $z$  轴正方向. 在粒子源定义模块中定义粒子源产生入射粒子的初射方向以及初射位置. 通过 SteppingAction.cc, RunAction.cc 模块对 $\gamma$ 输运的各个阶段进行控制并收集数据.

基于钙钛矿太阳能电池辐照实验的半经验公式, 通过注量外推法试图用少量的实验数据预测其辐射效应损伤趋势, 得到的曲线如图 7 所示, 这些曲线反映了辐照实验规律. 可以看出, 各参数的归一化系数 ( $A(\varphi)/A_0$ ) 随着辐照通量的增加而减小, 质子辐照下钙钛矿太阳能电池电学参数退化随辐照注量的变化较小, 电子和 $\gamma$ 辐照导致的电学参数退化注量的变化较大. 钙钛矿太阳能电池对电子和 $\gamma$ 辐照更为敏感, 是由于电子和 $\gamma$ 产生二次电子的质量轻、能量小, 可充分地 与电池材料相互作用并沉积较多的能量, 而 3 MeV 质子可直接穿透器件, 因此在器件结构内部沉积的能量较少.

## 5 结 论

本文基于钙钛矿太阳能电池开展了其空间辐照效应地面模拟实验研究, 包括质子、电子以及 $\gamma$ 辐照实验. 实验结果表明: 钙钛矿太阳能电池对电子和 $\gamma$ 辐照较为敏感, 随着电子注量和 $\gamma$ 累积剂量的增加, 电池的光电特性退化逐渐加剧, 其中 $\gamma$ 辐照引起的电池伏安特性退化最为严重; 钙钛矿太阳能电池表现出较好的抗质子辐照损伤的能力, 随着质子注量的累积, 短路电流变化较小, 开路电压基本保持不变, 电池效率可稳定保持为辐照前的 94%. 基于上述实验数据建立钙钛矿太阳能电池辐照损伤的半经验公式, 通过注量外推的方法以较少的实验数据预测钙钛矿太阳能电池的辐照损伤规律.

感谢中国科学院新疆理化技术研究所给予的电子和 $\gamma$ 辐照实验指导; 感谢西安交通大学电子科学与工程学院董化教授提供的实验样品和技术支持.

## 参考文献

- [1] Yoon S J, Kuno M, Kamat P V 2017 *ACS Energy Lett.* **9** 1507
- [2] Morana M, Wegscheider M, Bonanni A, Kopidakis N, Shaheen S, Scharber M, Zhu Z, Waller D, Gaudiana R, Brabec C 2008 *Adv. Funct. Mater.* **18** 1757
- [3] Barnham K W J, Mazzer M, Clive B 2006 *Nat. Mater.* **5** 161
- [4] Green M A 2001 *Prog. Photovoltaics* **9** 123
- [5] Li Y, He H, Dang W W, Chen X L, Sun C, Zheng J L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 098402 (in Chinese) [李燕, 贺红, 党威武, 陈雪莲, 孙璨, 郑嘉璐 2021 物理学报 **70** 098402]
- [6] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Shirai Y, Miyasaka T 2009 *J. Am. Chem. Soc.* **131** 6052
- [7] Green M A, Emery K A, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop E D 2014 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **23** 1
- [8] Jasenek A, Rau U, Weinert K, Kötschau I M, Hanna G, Voorwinden G, Powalla M, Schöck H W, Werner J H 2001 *Thin Solid Films* **387** 228
- [9] Li C J 1997 *Microw. Satell. Commun.* **3** 00470 (in Chinese) [李澄举 1997 微波与卫星通信 **3** 00470]
- [10] Bourgoin J C, Angelis N D 2001 *Sol. Energ. Mater. Sol. C.* **66** 467
- [11] Li Y P 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [李彦朋 2010 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [12] Wang J 2016 *M. S. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [王杰 2016 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [13] Grancini G, Roldan-Carmona C, Zimmermann I, Mosconi E, Lee X, Martineau D, Nabey S, Oswald F, De Angelis F, Graetzel M, Nazeeruddin M K 2017 *Nat. Commun.* **8** 15684
- [14] Meng L, You J, Yang Y 2018 *Nat. Commun.* **9** 5265
- [15] Bryant D, Aristidou N, Pont S, Sanchez-Molina I, Chotchunangatchaval T, Wheeler S, Durrant J R, Haque S A 2016 *Energy Environ. Sci.* **9** 1655
- [16] Lang F, Nickel N H, Bundesmann J, Seidel S, Denker A, Albrecht S, Brus V V, Rappich J, Rech B, Landi G, Neitzert H C 2016 *Adv. Mater.* **28** 8726
- [17] Durant B K, Afshari H, Singh S, Rout B, Eperon G E, Sellers I R 2021 *ACS Energy Lett.* **6-7** 2362
- [18] Lang F, Jošt M, Frohna K, Köhnen E, Al-Ashouri A, Bowman A R, Bertram T, Morales-Vilches A B, Koushik D, Tennyson E M, Galkowski K, Landi G, Creatore M, Stannowski B, Kaufmann C A, Bundesmann J, Rappich J, Rech B, Denker A, Albrecht S, Neitzert H C, Nickel N H, Stranks S D 2020 *Joule* **4** 1054
- [19] Kanaya S, Kim G, Ikegami M, Miyasaka T, Hirose K 2019 *J. Phys. Chem. Lett.* **10** 22
- [20] Miyazawa Y, Ikegami M, Chen H W, Ohshima T, Imaizumi M, Hirose K, Miyasaka T 2018 *iScience* **2** 148
- [21] Yang S, Xu Z Y, Xue S, Kandlakunta P, Cao L, Huang J S 2019 *Adv. Mater.* **31** 1805547
- [22] Li P, Dong H, Lan J H, Bai Y R, He C H, Ma L Y, Li Y H, Liu J X 2022 *Materials* **15** 4
- [23] Shim H E, Park J, Yeon Y, Lee N, Gwon H J 2022 *J. Korean Phys. Soc.* **3** 80

# Experimental study on irradiation of perovskite solar cells<sup>\*</sup>

Li Pei<sup>1)†</sup> Xu Jie<sup>2)</sup> He Chao-Hui<sup>1)</sup> Liu Jia-Xin<sup>1)</sup>

1) (*School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

( Received 17 February 2023; revised manuscript received 25 March 2023 )

## Abstract

Solar cell is an important energy source for spacecraft. It is significant to study its resistance to space particle irradiation. In the past ten years, the research hotspot of solar cells has focused on the perovskite solar cells (PSCs) because of their advantages of long carrier lifetime, high light absorption performance, low cost and easy preparation. By now the photoelectric conversion efficiency of PSCs has reached to 25.5%. Recently, PSCs were found to be robust to space particle irradiation, which makes them possible to be used in the satellites and spacecraft. The antiradiation effects of perovskite solar cells with different cell structures and preparation processes have been studied, but the obtained experimental results are different. In this work, the experiments on radiations of protons, electrons and gamma rays of the same PSCs are carried out. The photoelectric characteristics before and after space particle irradiation are characterized, so as to analyze the radiation effect of PSCs. The experimental results show that the PSCs are sensitive to electron radiation and gamma radiation. With the increase of electron fluence and gamma total dose, the degradation of photoelectric characteristics of PSCs intensifies gradually. For gamma radiation, PSCs exhibit the most significantly radiation sensitivity. The PSCs are found to be robust to the proton irradiation. With the increase of proton fluence, the short-circuit currents of PSCs change little, the open-circuit voltages remain essentially unchanged, and the cell efficiency can be stably maintained at 94% of the pre-irradiation performance. Based on the above experimental data, a semi-empirical formula is established, and the radiation damage law of PSCs can be predicted with less experimental data, which will support the space application of PSCs.

**Keywords:** perovskite solar cell, radiation experiments, proton, electron, gamma irradiation

**PACS:** 61.82.-d, 61.80.Fe, 61.80.Ed, 61.80.Hg

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230230

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12005159).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lipei0916@xjtu.edu.cn](mailto:lipei0916@xjtu.edu.cn)

## 钙钛矿太阳能电池辐照实验研究

李培 徐洁 贺朝会 刘佳欣

### Experimental study on irradiation of perovskite solar cells

Li Pei Xu Jie He Chao-Hui Liu Jia-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 126101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230230

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230230>

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

基于双层电子传输层钙钛矿太阳能电池的物理机制

Physical mechanism of perovskite solar cell based on double electron transport layer

物理学报. 2022, 71(20): 208802 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220725>

n-i-p结构钙钛矿太阳能电池界面钝化的研究进展

Research progress of interface passivation of n-i-p perovskite solar cells

物理学报. 2019, 68(15): 158803 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190468>

高效无空穴传输层碳基钙钛矿太阳能电池的制备与性能研究

Preparation and performance of high-efficient hole-transport-material-free carbon based perovskite solar cells

物理学报. 2018, 67(22): 228801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181457>

低温制备SnO<sub>2</sub>电子传输层用于钙钛矿太阳能电池

Low-temperature preparation of SnO<sub>2</sub> electron transport layer for perovskite solar cells

物理学报. 2022, 71(11): 118801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211930>

背电极材料、结构以及厚度等影响钙钛矿太阳能电池性能的研究

Influence of back electrode material, structure and thickness on performance of perovskite solar cells

物理学报. 2021, 70(19): 198404 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211037>

钙钛矿太阳能电池中缺陷及其钝化策略研究进展

Progress of defect and defect passivation in perovskite solar cells

物理学报. 2022, 71(16): 166801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220359>