



中华人民共和国国家标准

GB/T 38190—2019

航天用太阳能电池电子辐照试验方法

Test method of electron irradiation aerospace solar cells

2019-10-18 发布

2020-05-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)提出并归口。

本标准起草单位:上海空间电源研究所、中国科学院新疆理化技术研究所。

本标准主要起草人:杨洪东、杨广、姜德鹏、雷刚、陆剑峰、郭旗、陈国铃、瞿轶、王志彬、范襄、玛丽娅·黑尼、谭雪雁。



航天用太阳电池电子辐照试验方法

1 范围

本标准规定了航天用太阳电池开展地面模拟电子束辐照试验的仪器设备、试验测试项目、试验测试程序、试验中断与处理、报告与记录。

本标准适用于航天用太阳电池,包括单晶硅太阳电池、锗基单结砷化镓太阳电池、锗基三结砷化镓太阳电池、倒装三结砷化镓太阳电池、倒装四结砷化镓太阳电池和其他类型空间用太阳电池的电子辐照试验。



2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2297—1989 太阳光伏能源系统术语
GB/T 6494 航天用太阳电池电性能测试方法
GB/T 6495.4 晶体硅光伏器件的 *I-V* 实测特性的温度和辐照度修正方法
GB/T 6495.9—2006 光伏器件 第 9 部分:太阳模拟器性能要求
GB/T 6496—2017 航天用太阳电池标定方法
ISO 15387 航天系统 单结太阳能电池 测量和校准规程(Space systems—Single-junction solar cells—Measurements and calibration procedures)

3 术语和定义

GB/T 2297—1989 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

注量率 flux

单位时间内通过单位面积上的粒子数。

注:单位为电子每平方厘米秒[e/(cm²·s)]。

3.2

注量 fluence

某段时间内在单位面积上注入的粒子数量。

注 1:单位为电子每平方厘米(e/cm²)。

注 2:也可以看作注量率对时间的积分。

4 试验目的

通过开展航天用太阳电池电子辐照试验,为用户单位提供地面模拟试验数据,评估航天用太阳电池在空间带电粒子辐照环境下的适应能力。

5 仪器设备

5.1 一般要求

仪器设备一般要求包括：

- a) 航天用太阳电池测试、电子辐照试验设备应经过具有资质的计量机构检定、校准，并应在有效期内。
- b) 试验操作、测试技术人员需掌握太阳电池测试和电子辐照试验要求，电子辐照试验人员应按照国家法律法规要求取得相应的上岗证书。

5.2 太阳电池电性能测试设备

5.2.1 太阳模拟器

按照 GB/T 6495.9—2006 中定义的 A 级 AM0 太阳模拟器，且具有多段光谱调节功能；可输出标准测试光谱 AM0（一个太阳常数），标准辐照度为 $1\,367\text{ W/m}^2$ 。

5.2.2 温控系统

太阳电池测试温控系统应能保证在室温条件下将太阳电池温度控制在 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.2.3 电流-电压测试系统

测试系统中的电压表、采样设备、负载、测试平台、微机系统应符合 GB/T 6494 的规定。

5.2.4 标准太阳电池

与待测太阳电池具有相同的结构与光谱响应，对于多结太阳电池，还需与各子结相对应的标准子电池，按照 ISO 15387 中规定的方法进行封装、标定及维护，应符合 GB/T 6496—2017 的要求。

5.3 电子辐照试验设备

5.3.1 辐射源

地面模拟辐射源可选用电子加速器或电子枪。电子能量和束流强度应可调。推荐电子能量范围为 $200\text{ keV} \sim 3\text{ MeV}$ ，采用的电子能量点数大于或等于 1 个，包含 1 MeV 能量点。

5.3.2 真空度

电子辐照可以在真空中或空气中进行。若在空气中进行辐照，应当考虑电子在空气中的能量损失。

5.3.3 温度

试验过程中的样品温度可控，除特殊要求外，样品温度应控制在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。样品温度应通过热电偶或其他温度传感器进行监测。

5.3.4 辐照面积

电子束辐照面积应覆盖被辐照样品总面积的 110%。在使用散射箔片扩大辐照面积时，应确保电子束的能量和均匀性。

5.3.5 均匀性及不稳定性

为使太阳电池暴露在均匀的电子束辐照下,应保证电子束在整个辐照区域均匀稳定,不均匀性 $\leq 10\%$,不稳定性 $\leq 5\%/h$ 。

5.3.6 注量率

由于入射电子束会导致太阳电池温度升高,应选择适当的注量率。典型电子辐照注量率在 $10^9\text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \sim 10^{12}\text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 之间,建议电子辐照注量率不超过 $5 \times 10^{11}\text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

5.3.7 辐照注量

电子辐照注量应满足不同型号对航天用太阳电池电子辐照注量的要求,得到太阳电池电性能辐照衰减曲线,推荐范围为 $10^{13}\text{ e}/\text{cm}^2 \sim 10^{16}\text{ e}/\text{cm}^2$ 之间。

5.3.8 注量保证

使用连接到电流积分器的法拉第杯进行电子注量测量。使用法拉第杯进行准确的注量测定时,电子束线应正确对准。

5.4 退火设备

依据太阳电池辐照试验的要求,可选择进行辐照后退火。

6 试验测试项目

6.1 电子辐照试验项目

航天用太阳电池电子辐照试验采用一种或多种能量的电子进行多个注量下的电子辐照试验。

6.2 太阳电池电性能测试项目

航天用太阳电池电性能测试项目包括:

- a) 开路电压 V_{oc} ,单位为毫伏(mV);
- b) 短路电流 I_{sc} ,单位为毫安(mA);
- c) 最佳功率点电压 V_m ,单位为毫伏(mV);
- d) 最佳功率点电流 I_m ,单位为毫安(mA);
- e) 最佳输出功率 P_m ,单位为瓦(W);
- f) 光电转换效率 E_{ff} ;
- g) 填充因子 FF;
- h) 伏安特性曲线。

7 试验测试程序

7.1 试验流程

航天用太阳电池的电子辐照试验流程如图 1 所示。

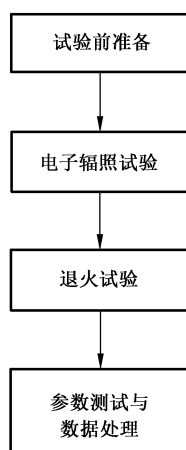


图 1 航天用太阳电池电子辐照试验流程

7.2 试验前准备

7.2.1 试验样品

针对每种电子辐照注量应取不少于 3 片航天用太阳电池,其电性能是稳定的,稳定度 $\leq 3\%$ 。

7.2.2 辐照前电性能测量

在电子辐照试验前,进行电池样品的电性能测量:

- 按照 GB/T 6494 相关规定方法测量太阳电池样品的电性能。
- 按照 GB/T 6495.4 中的相关规定方法测量太阳电池样品在多个温度点下的电性能参数,建议温度点个数不少于 5 个,范围不小于 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

7.3 电子辐照试验

根据用户要求,确定电子辐照试验中的粒子能量、辐照注量率、辐照注量点等参数后,步骤如下:

- 将样品固定紧贴在样品台上,样品背面不可悬空,电池表面垂直面向束流入射窗口,放置样品过程中,应防止污染样品;
- 开启加速器(或电子枪)、计算机、控制柜、监视系统等设备电源,检查辐照系统、温度监测、束流监测系统,确定能够正常工作;
- 调整电子加速器(或电子枪)入射到样品表面的粒子能量和注量率,满足用户要求的试验条件;
- 开始样品电子辐照,并记录电子束流、辐照时间等参数;
- 辐照可间断进行,达到要求总注量后,停止电子辐照,取出试验样品。

7.4 退火试验

对完成电子辐照试验的所有样品进行光子辐射与高温退火,步骤如下:

- 进行光子辐射:在 AM0 光照条件下,进行不小于 48 h 的光照,温度保持为 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持电池为开路状态;
- 进行高温退火:在 $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下退火 24 h 以上。

7.5 参数测试与数据处理

7.5.1 辐照后参数测试

辐照后参数测试,步骤如下:

- a) 按照 GB/T 6494 相关规定测量退火后的太阳能电池电性能。
- b) 按照 GB/T 6495.4 中的相关规定方法测量退火后的太阳能电池样品在多个温度点下的电性能参数,温度点个数一般不少于 5 个,范围不小于 25 ℃~65 ℃。

7.5.2 电性能参数衰减

测量电池样品在电子辐照试验前的电性能参数,包括开路电压(V_{oc})、短路电流(I_{sc})、最佳功率点电压(V_m)、最佳功率点电流(I_m)、光电转换效率(E_{ff})、填充因子(FF);在电池样品完成电子辐照试验、光子辐照与高温退火后,进行电性能参数测量,得出剩余因子,公式见式(1)~式(6):

$$\Delta_{V_{oc}} = V_{oc}' / V_{oc} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta_{I_{sc}} = I_{sc}' / I_{sc} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta_{V_m} = V_m' / V_m \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta_{I_m} = I_m' / I_m \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta_{E_{ff}} = E_{ff}' / E_{ff} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta_{FF} = FF' / FF \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$\Delta_{V_{oc}}$ ——太阳能电池开路电压辐照剩余因子;

V_{oc}' ——辐照后开路电压,单位为伏(V);

V_{oc} ——辐照前开路电压,单位为伏(V);

$\Delta_{I_{sc}}$ ——太阳能电池短路电流辐照剩余因子;

I_{sc}' ——辐照后短路电流,单位为安(A);

I_{sc} ——辐照前短路电流,单位为安(A);

Δ_{V_m} ——太阳能电池最佳功率点电压辐照剩余因子;

V_m' ——辐照后最佳功率点电压,单位为伏(V);

V_m ——辐照前最佳功率点电压,单位为伏(V);

Δ_{I_m} ——太阳能电池最佳功率点电流辐照剩余因子;

I_m' ——辐照后最佳功率点电流,单位为安(A);

I_m ——辐照前最佳功率点电流,单位为安(A);

$\Delta_{E_{ff}}$ ——太阳能电池光电转换效率辐照剩余因子;

E_{ff}' ——辐照后光电转换效率;

E_{ff} ——辐照前光电转换效率;

Δ_{FF} ——太阳能电池填充因子辐照剩余因子;

FF' ——辐照后填充因子;

FF ——辐照前填充因子。

7.5.3 多注量剩余因子

太阳能电池样品经电子辐照试验并进行光子辐照和高温退火后,计算获得多种辐照注量下的电性能参数剩余因子,以电子辐照注量为横坐标,电池各电性能参数辐照损伤剩余因子为纵坐标,进行二维绘图。然后,采用最小二乘法对曲线进行数值拟合,获得拟合模型以及相关参数值。

7.5.4 温度系数

太阳能电池样品在电子辐照试验前后,进行多个温度点下电性能测量,针对电子辐照试验前后、多种电子辐照注量的情况,以温度为横坐标,电压、电流电性能值为纵坐标,绘制每种情况下的二维图。然后,采用最小二乘法对曲线进行数值拟合,获得拟合模型后,不同温度下的电压电流可以模型获得,温度

系数为曲线斜率。

8 试验中断与处理

试验中断与处理要求如下：

- a) 太阳电池在电子辐照试验过程中,若发生断电等突发情况致使试验中断时,可在设备正常后,继续进行电子辐照试验,辐照注量累积中断前已进行的注量,总注量达到要求即可;
- b) 太阳电池在电子辐照后的光子辐射试验中,若发生断电等突发情况致使试验中断时,可在设备正常后继续进行光子辐射试验,总时间累积达到要求即可;
- c) 太阳电池在电子辐照试验后的高温退火过程中,若发生断电等突然情况致使试验中断时,可在设备正常后继续进行高温退火试验,总时间累积达到要求即可。

9 报告及记录

航天用太阳电池电子辐照试验报告应包括以下信息：

- a) 电池名称或型号;
 - b) 测试、试验日期;
 - c) 执行标准编号(GB/T 38190—2019);
 - d) 电子辐照试验单位;
 - e) 电子辐照条件;
 - f) 电池测试条件;
 - g) 样品数目、编号;
 - h) 电性能参数电子辐照衰减数据;
 - i) 电性能参数的多注量剩余因子图;
 - j) 电子辐照试验前后的电压、电流温度系数图。
-