

低能质子辐照下GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池串并联电阻特性研究

牟家瀛

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院，黑龙江 哈尔滨

收稿日期：2026年1月10日；录用日期：2026年2月3日；发布日期：2026年2月12日

摘要

本研究探究GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池在质子辐照下的电阻特性变化规律。相同能量质子辐照下，随质子注量的增加电池串联电阻上升，并联电阻下降；低能质子通过损伤发射区、基区阻碍载流子传输，同时在结区形成深能级缺陷诱发漏电流，共同降低电池性能。注量一致的条件下，170 keV(穿透顶电池损伤中电池核心区)与40 keV(损伤顶电池发射区)质子造成的串联电阻增幅最显著，130 keV(损伤中电池发射区)与100 keV(缺陷集中于隧道结)质子的影响较弱；并联电阻方面，170 keV质子因破坏中电池核心结区导致降幅最大，130 keV质子影响次之，40 keV与100 keV质子的作用相对轻微。本研究明确了质子能量、注量与电池电阻损伤的关联机制，为空间太阳电池抗辐照设计与寿命评估提供关键支撑。

关键词

GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池，低能质子辐照，串联电阻，并联电阻

Study on Series and Shunt Resistance Characteristics of GaInP/GaAs/Ge Tri-Junction Solar Cells under Low-Energy Proton Irradiation

Jiaying Mou

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: January 10, 2026; accepted: February 3, 2026; published: February 12, 2026

Abstract

This study investigates the variation law of resistance characteristics of GaInP/GaAs/Ge tri-junction solar cells under proton irradiation. Under proton irradiation of the same energy, the series resistance of the cells increases and the shunt resistance decreases with the increase of proton fluence. Low-energy protons impede carrier transport by damaging the emitter and base regions, and simultaneously induce leakage current by forming deep-level defects in the junction regions, which together degrade the cell performance. Under the condition of consistent fluence, 170 keV protons (which penetrate the top cell and damage the core region of the middle cell) and 40 keV protons (which damage the emitter region of the top cell) cause the most significant increase in series resistance, while the effects of 130 keV protons (which damage the emitter region of the middle cell) and 100 keV protons (whose defects concentrate in the tunnel junctions) are relatively weak. In terms of shunt resistance, 170 keV protons lead to the largest decrease due to the destruction of the core junction region of the middle cell, followed by 130 keV protons, and the effects of 40 keV and 100 keV protons are relatively slight. This study clarifies the correlation mechanism between proton energy, proton fluence and cell resistance damage, providing critical support for the radiation-hardened design and lifetime evaluation of space solar cells.

Keywords

GaInP/GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cells, Low-Energy Proton Irradiation, Series Resistance (R_s), Shunt Resistance (R_{sh})

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航天技术向深空探测、长寿命在轨运行等方向快速发展，航天器(如地球同步卫星、空间站、深空探测器等)对供能系统的可靠性、稳定性及长寿命要求愈发严苛[1]。供能系统的性能直接决定航天器的在轨服役周期与任务执行效率，而太阳电池作为空间供能的核心部件，其抗恶劣环境能力成为制约航天器性能的关键因素。三结 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池凭借 30% 以上的光电转化效率、优异的温度稳定性及抗辐射潜力，已逐步取代传统单结、双结太阳电池，成为高轨卫星、深空探测等航天任务的主流供能选择[2] [3]。据统计，当前全球 70% 以上的中高轨航天器均采用该类型太阳电池作为核心供能单元[4]。然而，空间环境中存在大量低能质子(能量 $\leq 200 \text{ keV}$)，其主要来源于太阳风、宇宙射线及地球辐射带，这类质子可穿透太阳电池的表层防护结构，在电池内部的发射区、基区、空间电荷区等不同区域引入晶格缺陷、空位等微观损伤[5] [6]。这些缺陷会直接阻碍光生载流子的输运过程，同时降低载流子收集效率，宏观上表现为电池串联电阻增大、并联电阻降低，进而引发短路电流衰减、开路电压下降、填充因子退化等一系列问题，严重威胁航天器的在轨服役能力，甚至导致任务提前终止[7] [8]。

近年来，国内外学者围绕低能质子辐照对太阳电池性能的影响开展了大量研究。王祖军等[3]系统综述了 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照损伤效应及加固技术，指出低能质子引起的微观缺陷是电池性能退化的核心诱因，但未明确不同能量质子与串并联电阻变化的定量关联；King 等[2]通过实验证证了该类型电池在空间环境中的高效性，却未深入分析辐照后电阻参数演变的物理机制；胡建民[9]针对 GaAs

单结电池的研究表明，质子辐照能量决定损伤区域分布，但三结电池的多区域协同损伤效应与电阻参数的对应关系尚未明确。此外，Zhan 等[6]通过研究发现低能质子辐照会导致并联电阻显著下降，但未揭示不同能量质子对电阻退化速率的影响规律；Zhao 等[10]的研究聚焦于串联电阻的变化趋势，却缺乏对缺陷类型与电阻参数关联的深入分析。总体而言，现有研究多集中于电池整体输出性能(如转化效率、开路电压)的退化描述，对串并联电阻这两个核心电学参数的演变规律、与质子能量和注量的定量关系，以及微观损伤机制的分析仍存在不足，尤其针对 40~170 keV 这一典型低能质子能量区间，不同能量质子的损伤特异性如何调控串并联电阻变化，尚未形成系统的研究结论，难以支撑太阳电池抗辐照结构设计的精准优化[8] [11]。

针对现有研究的不足，本研究以 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池为研究对象，聚焦 40~170 keV 能量范围内的低能质子辐照效应。通过设置 40 keV、100 keV、130 keV、170 keV 四种质子能量，开展系统的辐照实验。利用标准太阳模拟器测试辐照前后电池的 I-V 特性曲线，结合最大功率点法与短路电流斜率法计算串并联电阻值，拟合电阻参数随质子注量的变化趋势；基于不同能量质子的损伤区域分布特征，揭示串并联电阻变化与微观缺陷的关联，本研究成果旨在建立对电池性能退化的影响规律进而揭示低能质子辐照损伤的物理机制，为空间太阳电池的抗辐照结构设计、在轨寿命评估提供关键实验数据与理论支撑。

2. 实验

2.1. 实验样品与辐照条件

试验样品为 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池，电池通过金属有机化合物气相沉积法(MOCVD)制备，有效面积为 $3 \times 4 \text{ cm}^2$ ，空间 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池，在 25°C，AM0 光谱辐照下转换效率达到 $\eta = 25\% \sim 27\%$ ，其短路电流 $I_{sc} = 200 \text{ mA}$ 、开路电压 $V_{oc} = 2590 \text{ mV}$ 、最大功率 $P_m = 437.3 \text{ mW}$ 和填充因子 $FF = 83\%$ 。能量小于 200 keV 的低能质子辐照试验使用 КИФК 型空间辐照环境综合模拟，辐照能量设置为 40 keV、100 keV、130 keV、170 keV，每个能量下选取不同注量(0 cm^{-2} 、 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、 $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)，辐照过程中保持样品温度 25°C ± 2°C。

2.2. 电学参数测试与电阻计算方法

电池的 I-V 特性测试使用美国 Spectrolab spectrosun solar simulator model X25 MarkII型标准太阳模拟器。电池样品测试在 25°C、AM0 (辐射功率为 $136.7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 太阳光谱辐照条件下进行，参照太阳电池国际测试标准，测试了辐照前后电池样品的短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 和最大功率 P_m 等电学性能参数。

2.2.1. 串联电阻(R_s)计算：最大功率点法

V. N. Sin 和 R. P. Singh [12] 在 1983 年提出太阳电池串联电阻测试方法命名为最大功率点法，陈筑 [11] 在此基础上系统整理并简化了该方法，得核心公式：

$$R_s = \frac{V_m}{I_m} - \frac{A k T}{q(I_L - I_m)} \quad (1)$$

其中， V_m 为实测最大工作电压(单位 V)， I_m 为实测最大工作电流(单位 A)，光生电流 I_L 可以近似用短路电流 I_{sc} 代替(单位 A)， A 为二极管因子为常数， k 为玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)， T 为绝对温度(298.15 K)， q 为电子电荷($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。(1)式可用于确定串联电阻，此方法的特点是只需要测得短路电流 I_{sc} 以及最大功率点的电压 V_m 和电流 I_m ，可有效规避传统方法的近似误差。

2.2.2. 并联电阻(R_{sh})计算：短路电流斜率法

Bouzidi K 和 El-Adawi [13] [14] 等人提出可以用一条 I-V 特性曲线中测量的电学参数计算并联电阻，

魏晋云[6]在此基础上讨论并联电阻对 I~V 特性曲线的影响，完善修正得到并联电阻的表达式，即通过计算短路电流附近的斜率计算并联电阻，得到并联电阻使 I~V 特性曲线偏离并联电阻为无穷大的 I~V 特性曲线，偏离的程度表示了并联电阻的大小，该方法原理简洁、可操作性高。太阳电池 I~V 特性曲线在短路电流(Isc)附近，电压近似为 0，此时曲线斜率倒数的负值即为并联电阻。得到并联电阻简便的表达式：

$$\frac{dI}{dV_{V=0}} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (2)$$

其中 $\frac{dI}{dV_{V=0}}$ 为 I~V 特性曲线在 $V=0$ 处的斜率，其值的倒数并取负值即为并联电阻的阻值。用于拟合并联电阻，通过归一化作图即可得到并联电阻随注量变化的趋势。

2.3. 实验数据记录

不同能量和注量下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电学参数测试结果如表 1 所示。

Table 1. Electrical parameters of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells under proton irradiation with different energies and fluences

表 1. 不同能量和注量的质子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电学参数

质子能量	辐照注量/cm ⁻²	I_{sc}/A	V_{oc}/V	I_m/A	V_m/V
40 keV	0	0.240	2.460	0.210	2.065
	1×10^{11}	0.208	2.428	0.199	2.076
	4×10^{11}	0.189	2.202	0.159	1.787
	1×10^{12}	0.178	2.176	0.152	1.788
100 keV	0	0.240	2.460	0.210	2.065
	1×10^{11}	0.225	2.421	0.205	2.071
	4×10^{11}	0.195	2.380	0.184	1.980
	1×10^{12}	0.192	2.530	0.17	1.878
130 keV	0	0.240	2.460	0.210	2.065
	1×10^{11}	0.247	2.472	0.217	2.167
	4×10^{11}	0.199	2.070	0.186	1.860
	1×10^{12}	0.190	1.968	0.168	1.900
170 keV	0	0.240	2.460	0.210	2.065
	1×10^{11}	0.177	2.286	0.172	1.909
	4×10^{11}	0.170	1.943	0.152	1.806
	1×10^{12}	0.168	1.813	0.119	1.706

由表 1 中数据可知在相同能量下，随着辐照注量的增加电学参数整体呈现下降趋势，注量越高下降趋势越明显。在相同注量下，电学参数随能量的变化与不同能量的质子对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池损伤位置的不同而不同。由于质子辐照会在电池内部(发射区、基区、空间电荷区)引入晶格缺陷、空位等微观损伤，这些缺陷会成为电子-空穴对的复合中心，这些复合中心使得光生载流子还未到达空间电荷区完成收集，就与缺陷发生复合，导致载流子收集效率降低，因此 I_{sc} 、 I_m 下降；同时，空间电荷区的缺陷会降低内建电压，使 V_{oc} (由内建电压决定)降低，进而带动 V_m 下降；注量越高，缺陷数量越多，复合程度与内建电压降低越显著，参数退化越严重。170 keV 质子因为其能量较高，可穿透 GaInP 顶电池，直

接损伤 GaAs 中电池的基区、空间电荷区(中电池是电池的核心工作区)，这些区域的缺陷会严重阻碍载流子输运与收集，因此参数退化最显著；40 keV 质子能量较低，仅损伤 GaInP 顶电池的发射区，对核心工作区影响较小，因此退化程度弱于 170 keV；130 keV 质子主要损伤 GaAs 中电池的发射区，对核心结区的影响有限，注量较小情况下对顶电池损伤较轻， I_{sc} 略有上升，高注量才表现出明显退化；100 keV 质子主要作用在顶电池与中电池之间的隧道结区域，隧道结对载流子输运的影响较弱，且未破坏核心工作区的结构，因此参数退化程度最轻。

3. 结果与分析

3.1. 低能质子辐照对串联电阻(R_s)的影响

由表 1 中不同能量和注量下的电学参数，根据公式(1)可拟合得到串联电阻值，通过归一化作图，就可得到归一化的串联电阻随注量的变化趋势，用于研究太阳电池在低能质子辐照下的内部损伤机理，图 1 为不同能量的质子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池归一化的串联电阻随辐照注量变化的关系曲线。

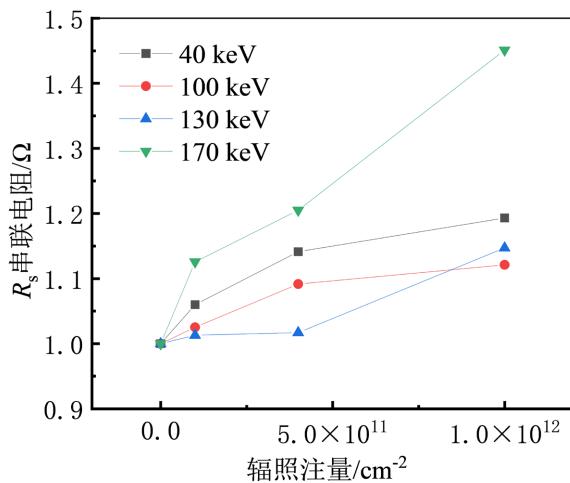


Figure 1. Effect of different fluences on the series resistance R_s
图 1. 不同注量对串联电阻 R_s 的影响

由图 1 可见，所有能量质子的 R_s 均随注量增加呈上升趋势。170 keV 与 40 keV 质子的 R_s 增长率最高，尤其在注量超过 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 后，增长更为明显，表明低能质子辐照造成大量缺陷，这些缺陷成为复合中心，使得电子 - 空穴对还未到达空间电荷区就发生复合，降低光生载流子的收集效率，造成短路电流退化，串联电阻增加。

在相同注量下，能量为 170 keV 下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的 R_s 增加幅度最大，其次是 40 keV，130 keV 下电池的 R_s 增幅较小， R_s 阻值增幅最小的是 100 keV 能量下的电池。这一规律与不同能量质子的损伤区域密切相关。170 keV 的入射质子透过了 GaInP 顶电池，仅对顶电池造成轻微的损伤，而 170 keV 质子主要停留 GaAs 中电池的空间电荷区和基区，中电池基区是主要工作区，因此 R_s 增加最显著。40 keV 质子虽能量较低，但其主要分布在 GaInP 顶电池的发射区和空间电荷区，造成 GaInP 顶电池的发射区损伤，形成更多的缺陷，这些缺陷会成为少子的复合中心，使得少子在扩散过程中更容易与缺陷发生复合，从而导致少子扩散长度减小，导致 R_s 显著增大。130 keV 质子主要损伤 GaAs 中电池发射区，而 100 keV 质子的缺陷主要分布于对载流子输运影响相对较小的隧道结，故二者与 40 keV 和 170 keV 能量下对 R_s 相比影响相对较弱。

3.2. 低能质子辐照对并联电阻(R_{sh})的影响

根据公式(2)可拟合得到并联电阻值，通过归一化作图，就可得到并联电阻随注量的变化趋势。图 2 为不同能量的质子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池归一化的并联电阻随辐照注量变化的关系曲线。

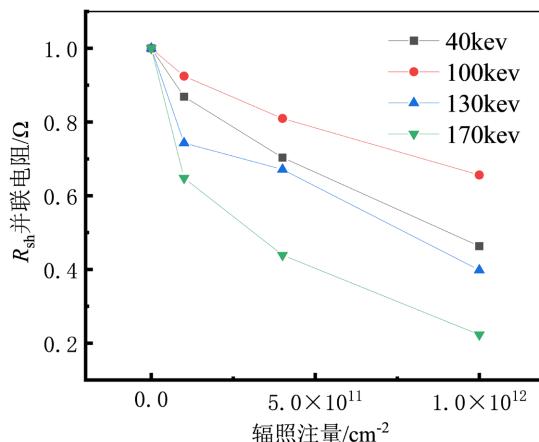


Figure 2. Effect of different fluences on the shunt resistance R_{sh}
图 2. 不同注量对并联电阻 R_{sh} 的影响

由图 2 可见， R_{sh} 随注量增加呈现下降的趋势。且注量越大，下降幅度越大特别是对于 170 keV 能量的质子辐照。并联电阻的降低主要源于空间电荷区(结区)损伤：低能质子辐照会在空间电荷区形成深能级缺陷，这些缺陷会显著促进电子 - 空穴对的产生与复合过程，形成漏电流。随着注量增加，空间区缺陷数量累积，漏电流持续增大，导致并联电阻加速下降；且空间电荷区对缺陷极为敏感，少量缺陷即可形成有效的复合通道，因此低注量下便出现明显的电阻衰减。

相同注量下，能量为 170 keV 质子辐照下的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池 R_{sh} 阻值下降幅度最大，与之相比 130 keV 能量下的电池其 R_{sh} 阻值下降幅度相对较小，其次是 40 keV 能量下的电池，100 keV 能量下的电池 R_{sh} 阻值下降幅度最小。这一规律与归一化开路电压(V_{oc})的退化顺序一致，证实了结区损伤是导致 R_{sh} 下降和 V_{oc} 退化的共同根源。170 keV 质子主要穿透 GaInP 顶电池，重点损伤 GaAs 中电池的基区和空间电荷区(结区)。GaAs 中电池是电池的核心工作区，其结区缺陷浓度峰值距结区最近，对结区的破坏最为严重，产生的漏电流最大，因此并联电阻降幅最显著。130 keV 质子主要损伤 GaAs 中电池的发射区和空间电荷区，对 GaInP 顶电池损伤较轻微。其缺陷分布峰值靠近 GaAs 中电池结区，虽损伤程度略低于 170 keV 质子，但仍能有效促进结区复合漏电流增大，因此并联电阻降幅仅次于 170 keV。40 keV 质子能量较低，仅作用于 GaInP 顶电池的发射区和空间电荷区，对顶电池结区仅形成“透过性”损伤，缺陷浓度低于 GaAs 中电池结区，复合漏电流规模较小，因此并联电阻降幅小于 170 keV 和 130 keV。100 keV 质子主要到达顶电池和中电池之间的隧道结位置，重点损伤 GaInP 顶电池的基区和空间电荷区，对 GaAs 中电池的结区基本无明显损伤。由于隧道结对载流子输运的影响相对较小，且未破坏主要工作区(GaAs 中电池)的结区结构，漏电流增加最少，因此并联电阻降幅最小。

4. 结论

本研究针对 40~170 keV 低能质子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的串并联电阻特性展开系统探究，通过实验数据拟合与损伤机理分析，明确了低能质子辐照与电池串、并联电阻参数变化的内在关联。

所有能量质子辐照下，串联电阻(R_s)均随辐照注量的增加而增加，当注量过大时(如 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) R_s 增长速率显著加快；并联电阻(R_{sh})随辐照注量的增加呈下降趋势，注量越大，下降幅度越显著，且空间电荷区对缺陷敏感，低注量下 R_{sh} 已出现明显下降。 R_s 的增大主要由质子辐照在电池发射区和基区引入的缺陷所致，这些缺陷成为电子-空穴对的复合中心，导致光生载流子未到达空间电荷区即发生复合，载流子收集效率降低，最终表现为 R_s 增大；高注量下缺陷持续累积，传输阻碍效应进一步加剧，故 R_s 增长幅度加剧。 R_{sh} 下降是由于低能质子在空间电荷区(结区)形成深能级缺陷，显著促进电子-空穴对的复合过程并产生漏电流；随注量增加，结区缺陷数量累积，漏电流持续增大，导致 R_{sh} 下降幅度增加，电池性能降低。

不同能量的质子，对串联电阻的增大程度有明显差异：170 keV 与 40 keV 质子辐照后，串联电阻的增大程度更显著；130 keV 与 100 keV 质子带来的串联电阻增大程度相对较小；不同能量的质子，让并联电阻下降的程度也有区别：170 keV 质子辐照后，并联电阻的下降幅度最明显；130 keV 质子的影响稍弱；40 keV 与 100 keV 质子带来的并联电阻下降程度相对较小。 R_s 阻值上升源于质子损伤区域的不同：170 keV 质子会穿透顶电池、损伤中电池的核心工作区，40 keV 质子会损伤顶电池的发射区，这两个区域的损伤都会严重阻碍载流子传输；而 130 keV 质子仅损伤中电池的发射区，100 keV 质子的缺陷集中在对载流子传输影响较小的隧道结，因此对串联电阻的影响更弱。 R_{sh} 阻值下降核心是结区的损伤程度不同：170 keV 质子会破坏中电池的核心结区，产生大量漏电流；130 keV 质子损伤的结区程度稍轻，漏电流增加得少一点；40 keV 质子仅轻度损伤顶电池的结区，100 keV 质子甚至不会破坏中电池的核心结区，漏电流的增加幅度很小，因此并联电阻的下降程度也更小。

参考文献

- [1] 中国航天科技集团有限公司. 中国航天科技活动蓝皮书(2023) [R]. 北京: 中国宇航出版社, 2024: 68-72.
- [2] King, R.R., Law, D.C., Krut, D.D., Edmondson, K.M., et al. (2018) High-Efficiency Multijunction Solar Cells for Space Applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **26**, 987-998.
- [3] 王祖军, 王兴鸿, 晏石兴, 唐宁, 等. GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池辐照损伤效应及加固技术研究进展[J]. 半导体光电, 2022, 43(3): 490-504.
- [4] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 第 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2020: 389-395.
- [5] Li, Y., Wang, H., Zhang, L., Chen, J., et al. (2020) Proton Irradiation Effects on Electrical Properties of GaInP/GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cells. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **67**, 1852-1858.
- [6] Zhang, S., Liu, J., Chen, W., Li, X., Wang, Y., Zhao, Z. and Zhang, H. (2019) Degradation Mechanism of Shunt Resistance in GaAs Solar Cells under Low-Energy Proton Irradiation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **197**, 109-116.
- [7] 魏晋云. 太阳电池并联电阻对 I-V 曲线的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2012, 32(5): 19-22.
- [8] Zhao, Y., Li, J., Sun, C., Wang, X., Zhang, Q. and Liu, H. (2021) Influence of Proton Energy on Series Resistance of Triple-Junction Solar Cells. *Journal of Semiconductors*, **42**, Article 054002.
- [9] 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]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [10] Singal, C.M. (1981) Analytical Expression for the Series-Resistance-Dependent Maximum Power Point and Curve Factor for Solar Cells. *Solar Cells*, **3**, 163-177. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(81\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0379-6787(81)90090-9)
- [11] 陈筑. 晶体硅太阳能组件功率损失研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [12] Singh, V.N. and Singh, R.P. (2000) A Method for the Measurement of Solar Cell Series Resistance. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **16**, 1823-1825. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/16/10/007>
- [13] Bouzidi, K., Chegaar, M. and Bouhemadou, A. (2007) Solar Cells Parameters Evaluation Considering the Series and Shunt Resistance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **91**, 1647-1651. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>
- [14] El-Adawi, M.K. and Al-Nuaim, I.A. (2001) A Method to Determine the Solar Cell Series Resistance from a Single I-V Characteristic Curve Considering Its Shunt Resistance—New Approach. *Vacuum*, **64**, 33-36. [https://doi.org/10.1016/s0042-207x\(01\)00370-0](https://doi.org/10.1016/s0042-207x(01)00370-0)