

# 不同剂量率下 N 型单晶硅太阳能电池辐照损伤效应

刘敏 汤晓斌 王昊  
刘云鹏 洪亮 许志恒 陈达  
(南京航空航天大学 核科学与工程系 南京 211106)

**摘要** 利用电子加速器等效空间电子辐照环境,对太阳能电池进行电子辐照损伤研究,探讨不同剂量率下太阳能电池受到的电子辐照损伤。实验中测试了 29 kGy/s 与 116 kGy/s 剂量率下,N 型单晶硅太阳能电池的  $I-V$  曲线,计算了电池少子寿命与串联电阻的变化。实验表明,随着电子辐照剂量的增加,太阳能电池的短路电流和最大输出功率等电学参数显著降低;在剂量为 200 kGy 的低剂量率下,电池的最大功率下降到原来的 60% 以下;而在同一剂量的情况下,低剂量率产生的辐照损伤效果要明显强于高剂量率产生的辐照损伤效果。

**关键词** 单晶硅太阳能电池; 辐照损伤效应; 剂量率; 电子加速器

作为在轨航天器的主要动力来源,太阳能电池在航天器运行过程中发挥着重要的作用。为了更充分地将太阳能转换成电能,空间太阳能电池必须尽可能大的面积裸露在空间环境中,进而为航天器提供充足的能源。但是空间环境存在着质子和电子等多种高能带电粒子,若这些高能粒子轰击电池,会造成电池性能下降,甚至失效,这对航天器的可靠性与安全运行构成重大威胁。

近年来,利用地面电子加速器等效空间电子辐照环境,对太阳能电池受到的电子辐照损伤进行研究,一直是国内外研究的热点<sup>[1-3]</sup>。但是相对于空间环境,地面电子加速器的剂量率要远远高于空间环境。20 世纪 80 年代,有学者发现双极型晶体管和 MOS 器件等半导体器件受到相同剂量辐照时,低剂量率下的辐射损伤要大于高剂量率,该现象引起强烈关注,并被称之为低剂量率辐射损伤增强效应(enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS)<sup>[4-6]</sup>。

本文使用 N 型单晶硅太阳能电池作为研究对象,探究 29 kGy/s 与 116 kGy/s 剂量率条件下,电子束对太阳能电池电子辐照损伤的影响,利用电池的宏观  $I-V$  特性曲线和微观性能参量(少子寿命、串联电阻)来表征电池的损伤程度,研究发现 N 型单晶硅太阳能电池存在明显的低剂量率辐射损伤增强效应,对此进行了分析与讨论。

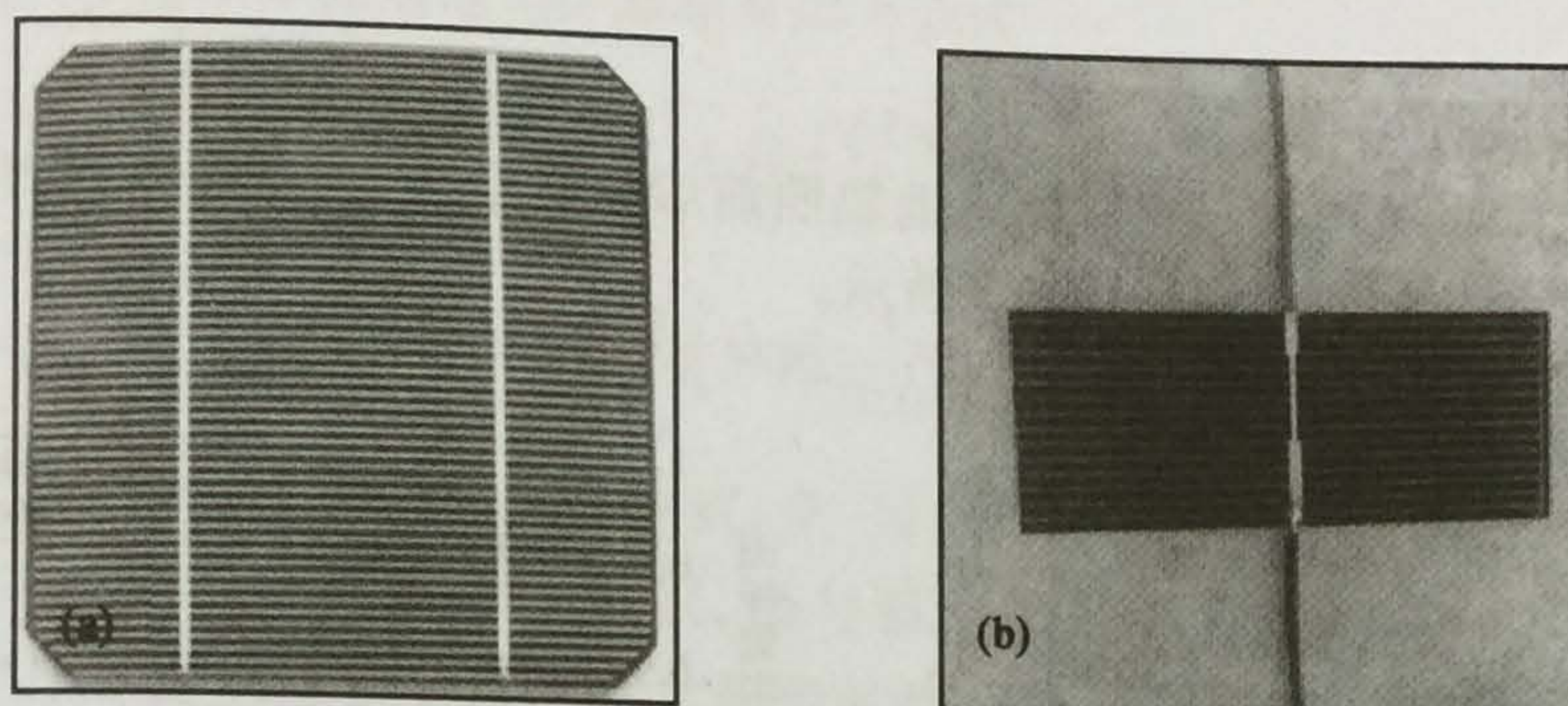
## 1 实验

### 1.1 实验样品

选取浙江矽源达能源有限公司生产的标准 N 型单晶硅太阳能电池作为研究对象,电



池样品大小为  $125\text{ mm} \times 125\text{ mm}$ , 将电池激光切割后制成实验样品, 样品尺寸为  $27\text{ mm} \times 63\text{ mm}$ , 厚度为  $200\text{ }\mu\text{m}$ , N型单晶硅太阳能电池, 如图1所示。



(a) 标准太阳能电池

(b) 切割后的太阳能电池

图1 N型单晶硅太阳能电池

实验中电池受到不同剂量率下多个剂量值的电子辐照, 每种条件下样品数量不少于3个, 辐照前电池样品的基本参数如表1所示。

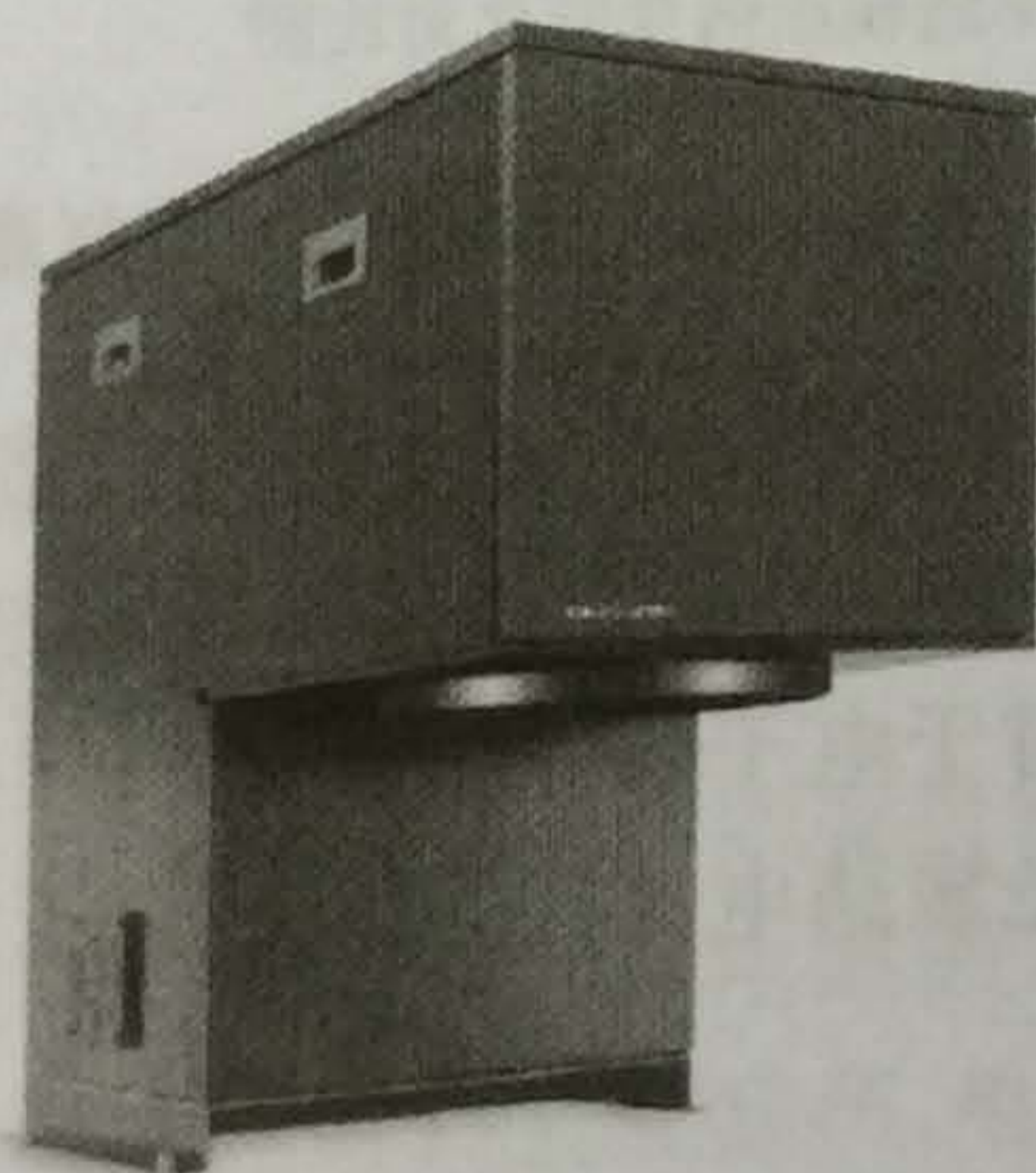
表1 N型单晶硅太阳能电池的基本参数

面积/ $\text{mm}^2$	厚度/ $\mu\text{m}$	填充因子/%	最大输出功率/W	短路电流/A	开路电压/V
$(27 \times 63) \pm 0.5$	$200 \pm 20$	68	0.178	0.427	0.580

## 1.2 实验条件

实验使用江苏达胜加速器制造有限公司自行研制的地纳米型电子加速器。利用加速器产生能量为  $2.8\text{ MeV}$  的电子束对太阳能电池进行辐照实验。在  $29\text{ kGy/s}$  与  $116\text{ kGy/s}$  剂量率下, 电池样品分别受到剂量为  $20\text{ kGy}$ 、 $40\text{ kGy}$ 、 $80\text{ kGy}$ 、 $120\text{ kGy}$ 、 $200\text{ kGy}$  的电子辐照。

使用双通道系统源表 (Keithley 2400A) 测量太阳能电池在 AM1.5 标准光源 (Oriol 94042A) 条件下, 辐照前后的  $I-V$  曲线, 温度为常温  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 实验设备如图2所示。



(a) Oriol 太阳光模拟器



(b) Keithley 2400A 数值源表

图2 辐照实验设备



## 2 实验结果

### 2.1 太阳能电池的 $I-V$ 测试

在标准光源条件下,测试太阳能电池辐照前后的电学性能参数,得到 N 型单晶硅太阳能电池的电学性能变化结果,如图 3 所示。

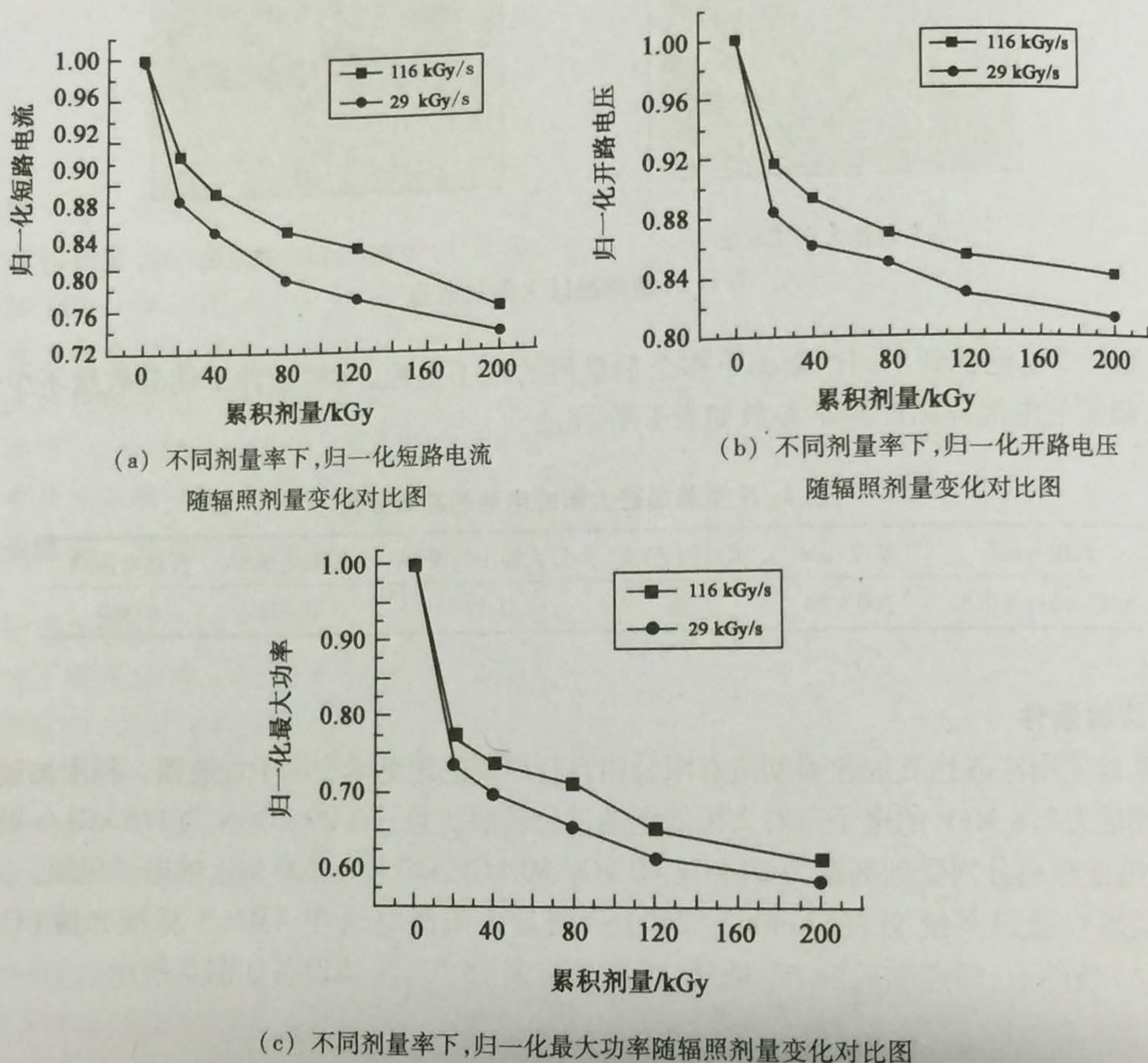


图3 不同剂量率下,N型单晶硅太阳能电池的归一化电学性能参数随辐照剂量变化对比图

在高、低剂量率下,N型单晶硅太阳能电池都随着电子辐照累积剂量的增加,电池的短路电流、开路电压和最大输出功率都出现不同程度的下降。同等累积剂量下,短路电流的衰减程度明显大于开路电压;剂量率的不同,对于电子辐照造成的辐照损伤效果有较大影响,其中,低剂量率造成的辐照损伤效果无论是短路电流还是开路电压等都要大于高剂量率。

### 2.2 单晶硅太阳能电池微观性能参量

#### 2.2.1 少数载流子

少数载流子寿命反映了少数载流子在 N 型单晶硅太阳能电池中的平均生存时间。



少子寿命越大, N型单晶硅太阳能电池收集的载流子数目越多, 电池的各方面电学性能也就越好。在经过不同剂量的电子辐照之后, 单晶硅太阳能电池的少子寿命随着辐照剂量的变化而变化, 根据太阳能电池相关理论有如下公式<sup>[7]</sup>:

$$\tau = D_n \left( \frac{qAn_i^2}{I_0 N_A} \right)^2 \quad (1)$$

$$I_{sc} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{0.026}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

式中,  $I_0$  为太阳能电池的反向饱和电流;  $D_n$  为电子扩散系数, 在低浓度掺杂的硅中  $D_n = 35 \text{ cm}^2/\text{s}$ ;  $n_i$  表示本征载流子浓度, 是与温度相关的函数, 常取  $T$  为 300 K 时的  $n_i = 8.3 \times 10^9/\text{cm}^3$ ;  $q$  为电子电荷;  $A$  为太阳能电池的受光面积;  $N_A$  为基区掺杂浓度;  $I_{sc}$  是短路电流;  $V_{oc}$  是开路电压。根据短路电流、开路电压和式(1)、(2)计算不同剂量率下, 少子寿命随辐照剂量的变化趋势, 如图4所示。

相同剂量率下, 少子寿命均随着辐照累积剂量的增加而减少。辐照累积剂量相同的条件下, 不同辐照剂量率对少子寿命的影响不同, 如图4所示, 可见低剂量率辐照下少子寿命的退化程度大于高剂量率下的少子寿命退化程度。

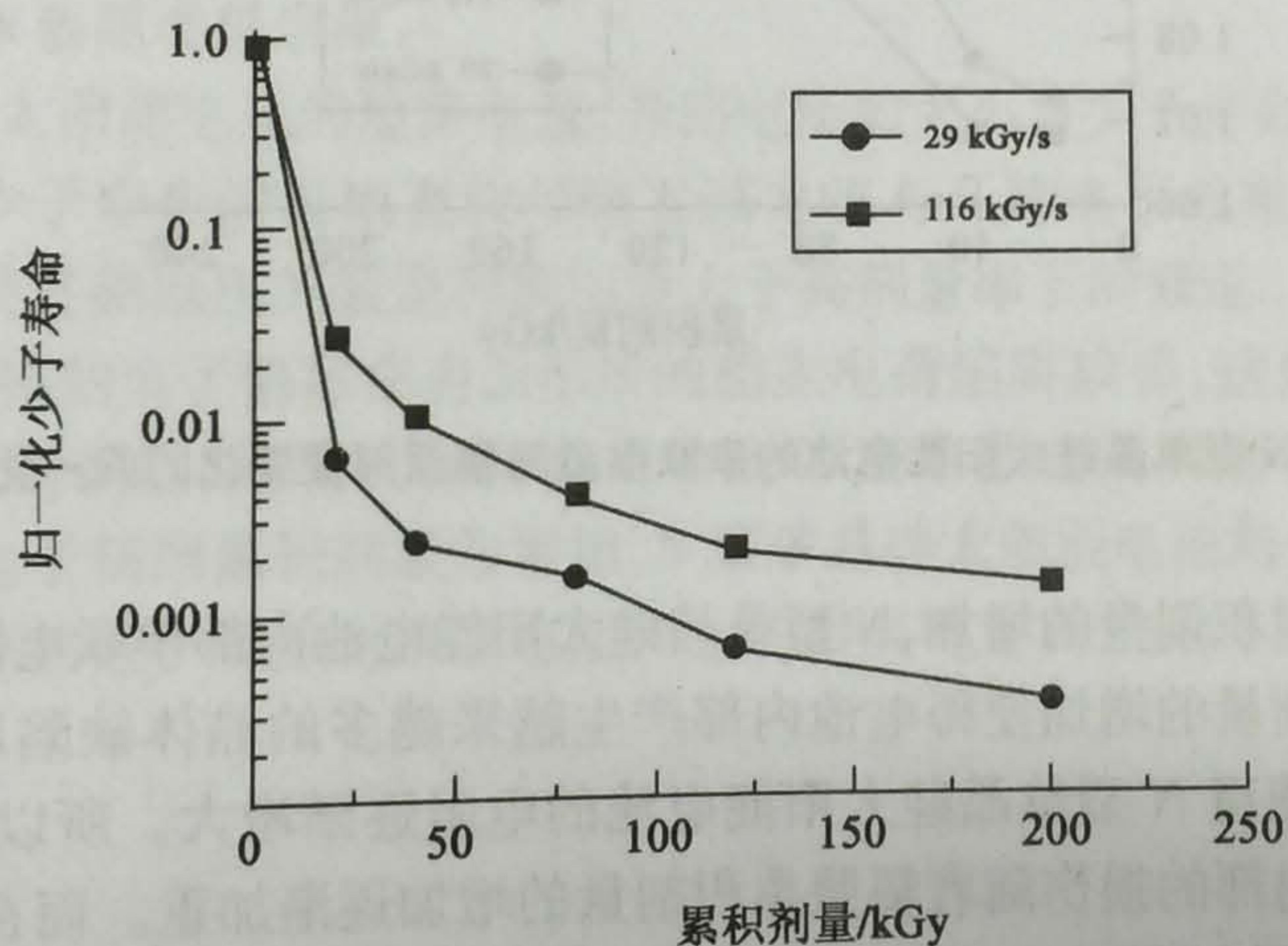


图4 不同剂量率下, N型单晶硅太阳能电池少子寿命随辐照剂量变化的归一化对比图

### 2.2.2 内部串联电阻

串联电阻是由于太阳能电池的原材料和本身制造过程导致的, 主要包括体电阻、电极电阻以及电极接触电阻等。内部电阻的大小直接影响 N型单晶硅太阳能电池的电学性能。电子辐照会对电池材料造成损伤, 电池内部的电阻也会因此发生变化, 进而影响电池的电学性能参数。

根据太阳能电池理论计算模型如公式(4)<sup>[8]</sup>:



$$R_s = \frac{V_{oc} \cdot \ln\left(\frac{I_{sat}}{I_{sc}}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{sc} - I_m}{I_{sat}}\right) - V_m}{I_m} \quad (3)$$

其中,  $I_{sc}$  是短路电流;  $V_{oc}$  为开路电压;  $I_{sat}$  为电池二极管的反向饱和电流, 反映的是光生载流子的复合强度, 一般取  $I_{sc}/I_{sat} = 10^9$ ;  $I_m$  为最大功率时的工作电流;  $V_m$  为最大功率时的工作电压。

利用已得到的电子辐照前后 N 型单晶硅太阳能电池的短路电流、开路电压、最大输出功率时的工作电流及电压等电学参数, 通过太阳能电池的理论模型计算电池的串联电阻, 并对电子辐照前后的串联电阻进行归一化处理, 结果如图 5 所示。

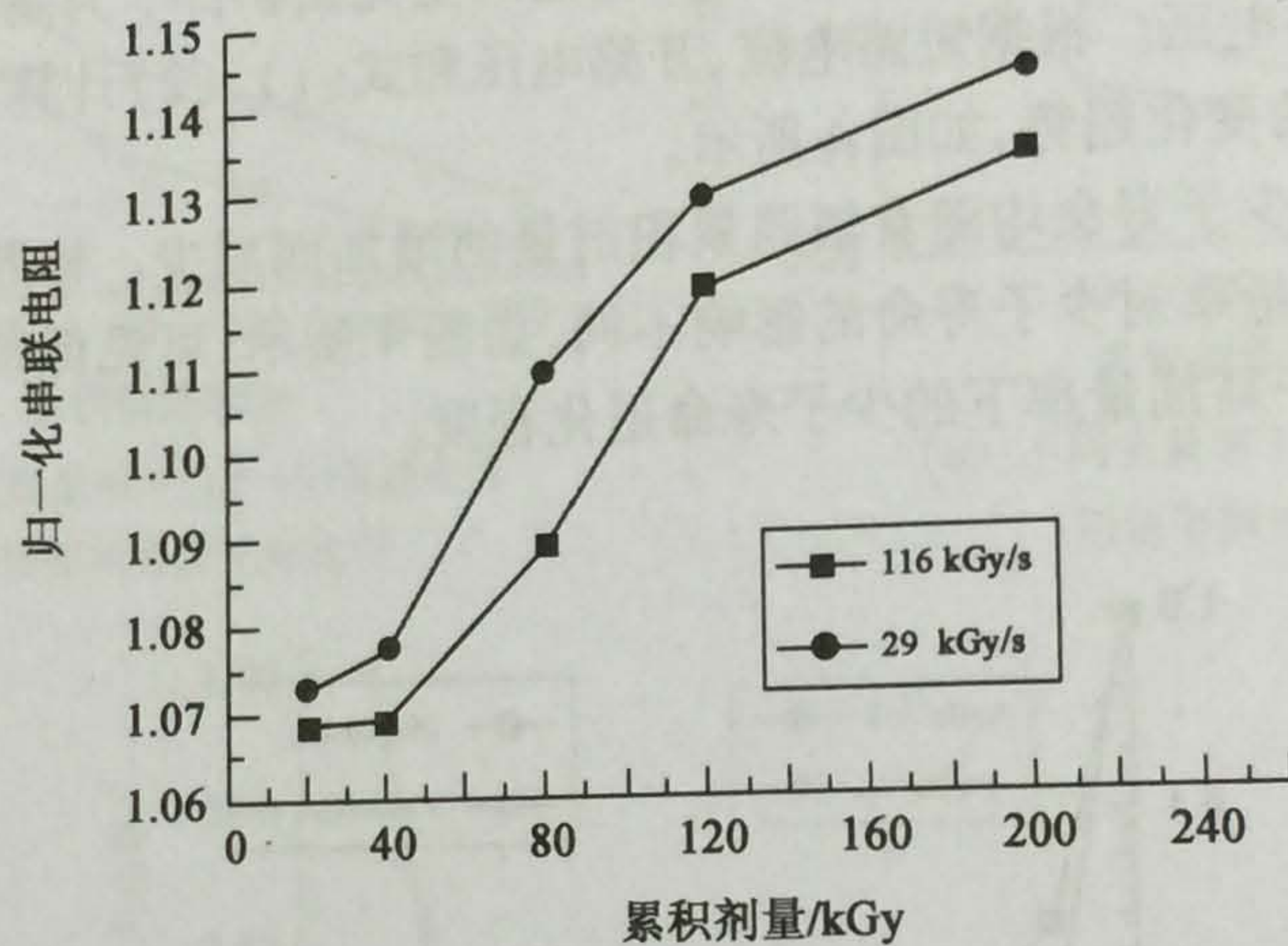


图5 N型单晶硅太阳能电池的串联电阻随辐照剂量变化的归一化图

随着电子辐照累积剂量的增加, N 型单晶硅太阳能电池内部串联电阻是逐渐增大的。这是因为电子辐照剂量的增加使得电池内部产生越来越多的晶体缺陷以及氧沉淀等, 这些晶体缺陷的存在使得 N 型单晶硅太阳能电池的电阻逐渐增大。所以电子辐照对 N 型单晶硅太阳能电池内部的损伤随着辐照累积剂量的增加逐渐加重。而在同等辐照累积剂量下, 低剂量率的电子辐照对 N 型单晶太阳能电池内部串联电阻的影响程度明显高于高剂量率下的影响程度。

### 3 结果分析与讨论

随着电子辐照剂量的增加, 在 N 型单晶硅太阳能电池中耗尽层沉积的能量越来越多, 因此, 在 N 型单晶硅太阳能电池中产生更多的晶体缺陷。缺陷越多, 复合的几率也增加, 同时少数载流子的扩散长度也降低, 寿命变短, 因此, 少数载流子在没有达到空间电荷区之前就已经发生了复合, 最终导致收集载流子数目大大降低, 电池电学性能出现退化。

N 型单晶硅太阳能电池的电子辐照效应包括电离辐射效应和位移损伤效应。电离辐



射效应主要作用区域为氧化层,而位移损伤效应主要作用在硅晶体。由于实验中电子辐照的能量与辐照累积剂量一致,因此,作用于硅晶体的位移损伤相差不多。实验中电池损伤的不一致主要是由电离辐射效应引起。

N型单晶硅在进行表面钝化时,表面形成了Si-SiO<sub>2</sub>界面,该界面十分敏感,易引起辐照感生缺陷;而电离损伤效应主要就是对这个界面造成损伤。在SiO<sub>2</sub>层中存在大量的空位缺陷,这些空位缺陷以及其中的悬浮键,一般选择使用通入加热的氢气来进行氢化处理。辐照时,在氧化层中产生大量的电子与空穴以及带正电的氢离子。在电池内建电场的作用下,向两端迁移,由于电子的迁移率很高,电子很快被扫出氧化层,而空穴以及氢离子向Si-SiO<sub>2</sub>界面运动,空穴的迁移率相对氢离子而言大得多(大约3个量级),空穴先一步到达界面与界面缺陷结合形成带正电的氧化物缺陷;带正电的氧化物缺陷形成电场阻碍氢离子向界面迁移,与界面缺陷结合生成界面态缺陷。

高剂量率时,达到相同的剂量所需要的时间短,所以短时间内可以生成大量的氧化物陷阱电荷,它们在界面上形成一个强的空间电场。由于强电场的存在,使得氢离子的运动受到阻碍,很难进入界面。而低剂量率的电子辐照形成的电场相对较弱,所以更多的氢离子进入界面,在界面中形成了大量的界面态缺陷,导致更大的辐照损伤<sup>[6,9-10]</sup>。而大量缺陷的存在,使得少数载流子的表面俘获几率大大增加,因此导致少子寿命大大降低。所以与高剂量率的电子辐照少子寿命的影响相比,低剂量率的电子辐照对少子寿命的影响更大,出现低剂量率辐照增强现象。

N型单晶硅太阳能电池的短路电流、开路电压的大小与少子寿命成正比,所以随着辐照剂量的增加,少子寿命的衰减直接导致短路电流与开路电压的减少。同时,低剂量率下,短路电流以及开路电压的衰退程度明显大于高剂量率下的衰退。

由于低剂量率的电子辐照在表面形成的感生电荷陷阱较多,这些感生电荷缺陷容易与氧结合形成新的缺陷以及氧沉淀,从而导致N型单晶硅太阳能电池的体电阻变化加剧。因此,随着电子辐照累积剂量的增加,N型单晶硅太阳能电池的内部串联电阻逐渐增大,并且低剂量率的电子辐照对串联电阻产生的影响明显大于高剂量率的电子辐照影响。

## 4 结论

本文研究电子辐照剂量率对于太阳能电池辐照损伤结果所产生的影响,通过测量辐照前后的N型单晶硅太阳能电池的*I-V*特性,探究了其短路电流、开路电压、最大功率以及转换效率等宏观电学性能的变化;根据已有的实验数据,采用理论计算方法,比较不同剂量率、不同累积剂量的电子辐照对N型单晶硅太阳能电池的少子寿命以及内部串联电阻的影响。经过讨论与分析得到如下结论:

1) 同等累积剂量下,不同剂量率的电子辐照对N型单晶硅太阳能电池电学性能的影响程度不同。低剂量率的电子辐照对N型单晶硅太阳能电池的短路电流、开路电压、最大功率影响明显大于高剂量率的电子辐照所造成的影响。

2) 同等累积剂量下,不同剂量率的电子辐照对N型单晶硅太阳能电池微观结构性能的影响程度不同。低剂量率的电子辐照对N型单晶硅太阳能电池的少子寿命以及内



部串联电阻的影响明显大于高剂量率的电子辐照所造成的影响。

3) 通过比较不同剂量率下电池的宏观电学性能和微观性能,研究发现对于N型单晶硅太阳能电池在29 kGy/s与116 kGy/s剂量率下也存在低剂量率增强效应。

### 参考文献

- [1] 胡建明. GaAs 太阳能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.
- [2] GAO Xin, YANG Sheng-sheng, XUE Yu-xiong, et al. Effects of electron radiation on shielded space triple-junction GaAs solar cells[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(11): 5 015 - 5 019.
- [3] YAMAGUCHI M. Radiation-resistant solar cells for space use[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001, 68(1): 31 - 53.
- [4] HJALMARSON H P, PEASE R L, HEMBREE C E, et al. Dose-rate dependence of radiation-induced interface trap density in silicon bipolar transistors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, 25(1 - 2): 269 - 273.
- [5] 郑玉展, 陆妩, 任迪远, 等. 不同电子通量下 NPN 晶体管的辐照损伤研究[C]//第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集(下册), 2008.
- [6] 高博, 余学峰, 任迪远, 等. p 型金属氧化物半导体场效应晶体管低剂量率辐射损伤增强效应模型研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 068702.
- [7] 马逊, 刘祖明, 陈庭金, 等. 利用太阳能电池  $I-V$  特性测量其基区少数载流子寿命[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 905 - 909.
- [8] 张华林, 陆妩, 任迪远, 等. 双极晶体管的低剂量率电离辐射效应[J]. 半导体学报, 2004, 25(12): 1 675 - 1 679.
- [9] 廖志凌, 阮新波. 硅太阳能电池串联电阻的一种估算新方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 88 - 92.
- [10] 张廷庆, 刘传洋, 刘家璐, 等. 低温低剂量率下金属 - 氧化物 - 半导体器件的辐照效应[J]. 物理学报, 2001, 50(12): 2 434 - 2 438.