

## 倒置四结 (IMM4J) 太阳能电池中 InGaAs (1.0eV) 和 InGaAs (0.7eV) 子电池高能电子辐照退火效应

张延清 齐春华 周佳明 刘超铭 马国亮 蔡勛升 王天琦 霍明学

## Thermal annealing effects of InGaAs (1.0eV) and InGaAs (0.7eV) sub-cells of inverted metamorphic four junction (IMM4J) solar cells under 1MeV electron irradiation

Zhang Yan-Qing Qi Chun-Hua Zhou Jia-Ming Liu Chao-Ming Ma Guo-Liang Tsai Hsu-Sheng Wang Tian-Qi Huo Ming-Xue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 228802 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200557

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200557>

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

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>

GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池不同能量质子辐照损伤模拟

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

物理学报. 2020, 69(9): 098802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191878>

分子动力学模拟钠硼硅酸盐玻璃电子辐照诱导的结构演化效应

Structure evolution of electron irradiated borosilicate glass simulated by molecular dynamics

物理学报. 2017, 66(10): 106102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.106102>

晶格失配对GaInP/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>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<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As triple-junction solar cells

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

退火效应增强铁磁异质结太赫兹发射实验及机理

Annealing effect on terahertz emission enhancement from ferromagnetic heterostructures

物理学报. 2020, 69(20): 200702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200526>

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>

# 倒置四结 (IMM4J) 太阳电池中 InGaAs (1.0 eV) 和 InGaAs(0.7 eV) 子电池 高能电子辐照退火效应\*

张延清<sup>1)</sup> 齐春华<sup>1)†</sup> 周佳明<sup>2)</sup> 刘超铭<sup>1)2)‡</sup> 马国亮<sup>1)</sup>  
蔡勖升<sup>1)</sup> 王天琦<sup>1)3)</sup> 霍明学<sup>1)</sup>

1) (哈尔滨工业大学, 空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

3) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2020年4月15日收到; 2020年7月7日收到修改稿)

本文为研究 1 MeV 电子辐照倒置四结 (IMM4J) 太阳电池 InGaAs(1.0 eV) 和 InGaAs(0.7 eV) 关键子电池的退火效应, 将辐照后的两种子电池在 60—180 °C 温度范围累计退火 180 min, 并对不同退火温度、退火时间下的两种子电池进行了光 IV 测试、暗 IV 测试和光谱响应测试. 实验结果表明两种子电池的开路电压  $V_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$  和最大输出功率  $P_{max}$  随着退火时间的延长逐渐恢复, 温度越高, 恢复程度越大. 在相同的退火条件下, InGaAs(1.0 eV) 子电池的恢复程度比 InGaAs(0.7 eV) 子电池小. 本文通过对暗特性曲线进行双指数模型拟合, 得到不同退火条件下两种子电池的串联电阻  $R_s$ 、并联电阻  $R_{sh}$ 、扩散电流  $I_{s1}$ 、复合电流  $I_{s2}$ . 结果表明在退火过程中两种子电池的  $R_{sh}$  逐渐增大,  $R_s$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  逐渐减小. 温度越高, 退火时间越长, 恢复程度越大. 在退火 60 min 后两种子电池的  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$  恢复程度均可达到整体恢复程度的 85% 以上. InGaAs(1.0 eV) 子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  的恢复程度远大于 InGaAs(0.7 eV). 本文建立了短路电流密度  $J_{sc}$  和缺陷浓度  $N$  的等效模型, 以此计算得到 InGaAs(1.0 eV) 和 InGaAs(0.7 eV) 两种子电池的热退火激活能分别为 0.38 eV 和 0.26 eV.

**关键词:** 倒置四结太阳电池, 电子辐照, 退火效应, 热退火激活能

**PACS:** 88.40.jp, 88.40.H-, 88.40.fl

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200557

## 1 引言

倒置四结 (IMM4J) 太阳电池 GaInP(1.89 eV)/GaAs (1.41 eV)/In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (1.0 eV)/In<sub>0.58</sub>Ga<sub>0.42</sub>As (0.7 eV) 是根据光谱匹配原则设计的新型太阳电池, 同正向三结 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池相比

具有更高的光电转化效率<sup>[1,2]</sup>. 美国国家可再生资源实验室 (NREL) 科研人员制备成的 IMM4 J 电池在 AM1.5D 327 suns 下效率可达  $(43.8 \pm 2.2)\%$ , 在 AM1.5D 869 suns 下转化效率达到  $(42.9 \pm 2.1)\%$ <sup>[3]</sup>. 天津三安光电有限公司研究人员通过金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 制备的 IMM 系列电池同正向三结电池相比转化效率高 5% 左右<sup>[4]</sup>.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11805045, 61704039, 61771167 和 11775061)、强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室 (批准号: SKLIPR2015, SKLIPR1912) 和哈尔滨工业大学科研创新基金 (批准号: HIT.NSRIF.2019007, HIT.NSRIF.20190028) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qichunhua@hit.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: cmliu@hit.edu.cn

此外, IMM4J 电池还可以键合在轻质基体上, 该实验室利用剥离膜技术成功制备了轻质 IMM 系列薄膜柔性太阳电池<sup>[5]</sup>. 上海大学通过金属背支撑刻蚀技术制备了柔性三结太阳电池<sup>[6]</sup>. 美国波音实验室对其自主研制的 IMM4J 电池进行了电子辐照实验, 发现其输出功率损伤程度和 IMM3 J 电池相近, 在 1 MeV 电子  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  通量下注入  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  后, IMM4J 和 IMM3J 剩余功率分别为 80% 和 84%<sup>[7]</sup>. 光荧光 (PL) 测试定性地证明了被辐照的  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (1.0 eV) 子电池的  $\tau_{\text{eff}}$  退化程度高于 GaAs 子电池, 使得  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (1.0 eV) 子电池电性能退化更快<sup>[8]</sup>.

除了带电粒子辐照损伤外, 温度对太阳电池的输出性能也有很大影响. 近地轨道向阳面温度可高达 200 °C, 因此研究 200 °C 以下退火太阳电池的输出性能具有实际意义. Loo 等<sup>[9]</sup> 对 AlGaAs/GaAs 太阳电池进行了 1 MeV 电子和 15—40 MeV 质子辐照后性能退化规律及热退火效应的研究. 美国 Hughes 实验室<sup>[10,11]</sup> 和 NASA Langley 研究中心<sup>[12,13]</sup> 对单结 GaAs 电池进行了带电粒子辐照损伤实验与热退火实验. 在辐照过程中的少子扩散长度的缩短和多子去除效应是 Ge 基 GaAs 电池的短路电流和开路电压损伤的主要原因<sup>[14]</sup>. 1 MeV 电子辐照后的单结 GaAs 电池在 200 °C 真空退火 15 h 后输出短路电流完全恢复, 在 200 °C 以下退火光谱响应 (QE) 和短路电流有所恢复. 200 °C 热退火使质子辐照后的单结 GaAs 电池输出性能部分恢复<sup>[15]</sup>. 日本丰田工业大学研究人员对不同结构的 GaInP 太阳电池进行了电子辐照实验以及退火研究, 结果表明 GaInP 子电池在退火过程中缺陷浓度降低, 电学性能恢复<sup>[16]</sup>. 此外, 光照和正向偏置条件下的少数载流子注入对 GaInP 子电池的退火有增强作用. 通过计算得到 GaInP 电池的热退火激活能为 1.1 eV. PL 测试显示热退火使得  $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ /GaAs 少子寿命恢复, 这是由于热退火使得电池位错运动, 导致线缺陷浓度降低<sup>[17]</sup>. 一般来说, 太阳电池样品外延生长后, 对其芯片处理过程中会对其进行 15 min 350 °C 热退火处理, 此工艺可增强电池样品上下电极的欧姆接触, 减小其串联电阻; 同时可以大幅减少由外延生长引入的原生缺陷, 从而保证电池样品的性能与热稳定性. 目前, 关于 IMM4J 电池及  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  子电池和  $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$  子电池带电粒子辐照缺陷的退火效应研究还未见报道.

本文对 1 MeV 电子辐照后 IMM4J 太阳电池关键子电池  $\text{InGaAs}$ (1.0 eV) 和  $\text{InGaAs}$ (0.7 eV) 进行了热退火实验, 深入研究两种  $\text{InGaAs}$  子电池的光特性与暗特性, 得到了两种子电池的光输出性能、光谱响应性能与暗电路参数的变化规律, 并计算得到两种  $\text{InGaAs}$  子电池的热退火激活能.

## 2 实验

本实验所用样品为扬州乾照光电提供的 IMM4J 电池第三结  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (1.0 eV) 与第四结  $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$ (0.7 eV) 关键子电池. 两种子电池表面积均为 10 mm × 10 mm, 采用 MOCVD 工艺, 利用 7 阶晶格失配渐变缓冲层结构调整晶格常数, 在 GaAs 临时衬底开始外延生长. 在这些电池样品中, 为了保证子电池与 IMM4 J 电池对应结具有相同的光电和辐照损伤特性, 只有相应的结制成 PN 结.

图 1(a) 给出了  $\text{InGaAs}$ (1.0 eV) 的子电池结构, 在 GaAs 层与  $\text{InGaAs}$ (1.0 eV) 之间外延生长了 3000 nm 的晶格常数渐变缓冲层. P 型掺杂浓度为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 厚度为 3000 nm; N 型掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 厚度为 100 nm. 图 1(b) 给出了  $\text{InGaAs}$ (0.7 eV) 子电池结构, 在 GaAs 层与  $\text{InGaAs}$ (1.0 eV) 之间和  $\text{InGaAs}$ (1.0 eV) 与  $\text{InGaAs}$ (0.7 eV) 之间分别外延生长了 3000 nm 的渐变缓冲层. 在 N 型  $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$  和 P 型  $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$  之间含有本征层, 形成 PIN 结构. P 型掺杂浓度为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 厚度为 3000 nm; N 型掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 厚度为 300 nm; 本征层厚度为 100 nm. 图 2 是两种  $\text{InGaAs}$  子电池样品在 AM1.5G 光谱条件下的  $I$ - $V$  特性曲线. 在室温下,  $\text{InGaAs}$ (1.0 eV) 子电池的开路电压  $V_{\text{oc}}$ , 短路电流  $I_{\text{sc}}$ , 最大输出功率  $P_{\text{max}}$  分别为 0.5089 V, 18.25 mA 和 7.3 mW.  $\text{InGaAs}$ (0.7 eV) 子电池的开路电压  $V_{\text{oc}}$ , 短路电流  $I_{\text{sc}}$ , 最大输出功率  $P_{\text{max}}$  分别为 0.2529 V, 11.66 mA 和 1.94 mW.

1 MeV 电子辐照使用黑龙江技术物理研究所的高压电子加速器. 在大气室温环境下进行 1 MeV 电子辐照实验, 辐照通量选择为  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大注量为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . 辐照后样品在 60—180 °C 暗置开路条件下退火 180 min. 在退火过程中温度稳定性为  $\pm 1$  °C. 分别在退火 0, 3, 5, 10, 15, 30,

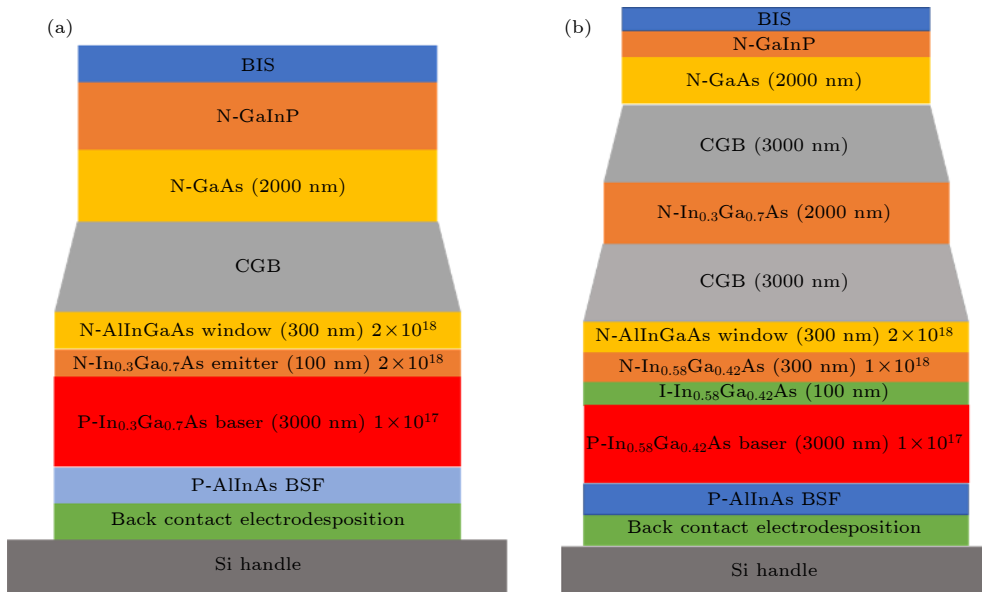


图 1 InGaAs (1.0 eV) 和 InGaAs (0.7 eV) 子电池结构示意图 (a) InGaAs (1.0 eV); (b) InGaAs (0.7 eV)

Fig. 1. Configurations of the InGaAs (1.0 eV) and InGaAs (0.7 eV) sub-cells: (a) InGaAs (1.0 eV); (b) InGaAs (0.7 eV).

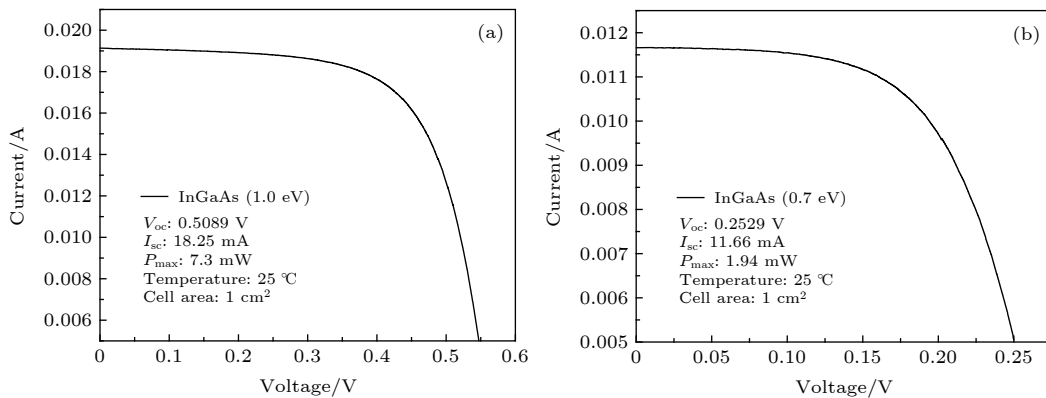


图 2 InGaAs(1.0 eV) 和 InGaAs(0.7 eV) 子电池  $I$ - $V$  特性曲线 (a) InGaAs (1.0 eV); (b) InGaAs (0.7 eV)

Fig. 2. IV curves of the InGaAs(1.0 eV) and InGaAs (0.7 eV) sub-cells: (a) InGaAs(1.0 eV); (b) InGaAs (0.7 eV)..

60, 120 和 180 min 时对样品进行光特性  $I$ - $V$  测试、暗特性  $I$ - $V$  测试以及光谱响应测试. 本实验光特性  $I$ - $V$  测试使用上海赫爽 HSC1 型太阳电池测试系统, 暗特性  $I$ - $V$  测试使用美国 Keithley 2636 A 双通道系统数字源表, 光谱响应测试使用美国 PV Measurements 公司 QEX10 型太阳电池量子效率测试系统.

### 3 结果与分析

通过 CASINO 软件模拟 1 MeV 电子垂直入射 InGaAs(1.0 eV) 和 InGaAs(0.7 eV) 两种子电池中的运动轨迹, 结果显示 1 MeV 电子在两种子电池材料的入射深度达  $8 \times 10^5$  nm, 远超两种子

电池的有源区厚度, 因此, 可以认为 1 MeV 电子辐照对两种子电池近似产生均匀损伤. 图 3(a) 和图 3(b) 分别为两种子电池的 CASINO 模拟结果.

两种 InGaAs 子电池除栅线的表面覆有 130—140 nm 左右单晶  $\text{Al}_2\text{O}_3$  钝化层来减少电池表面光反射损失, 增加光透射来提高光电转换效率. 为此, 对辐照前和 1 MeV 电子辐照  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  后的电池样品, 经超声波清洗表面后, 进行了原子力显微镜 (AFM) 测试, 结果如图 4 所示. 结果显示样品表面有凹凸不平的减反射层结构, 辐照前后样品表面粗糙度均方根  $R_{rms}$  分别为 7.213 和 7.362 nm, 可见 1 MeV 电子辐射对样品表面粗糙度几乎不产生影响, 可以近似忽略表面损伤对电性能的影响.

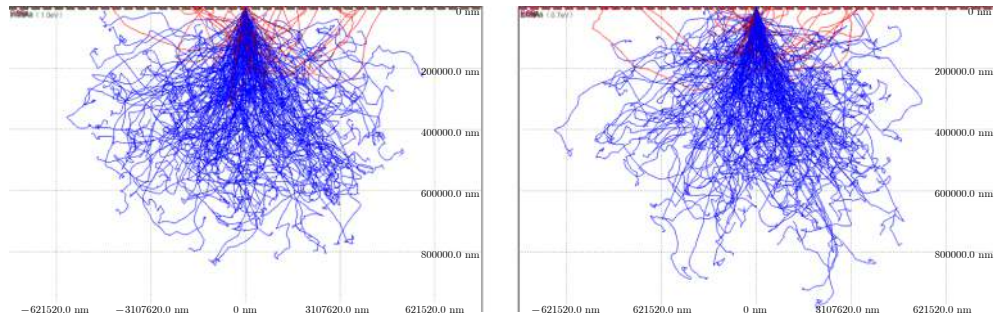


图 3 1 MeV 电子在 InGaAs (1.0 eV) 和 InGaAs (0.7 eV) 子电池中运动轨迹 (a) InGaAs (1.0 eV); (b) InGaAs(0.7 eV)

Fig. 3. The trajectory of 1 MeV electron in InGaAs (1.0 eV) and InGaAs (0.7 eV) sub cells: (a) InGaAs(1.0 eV) ; (b) InGaAs (0.7 eV).

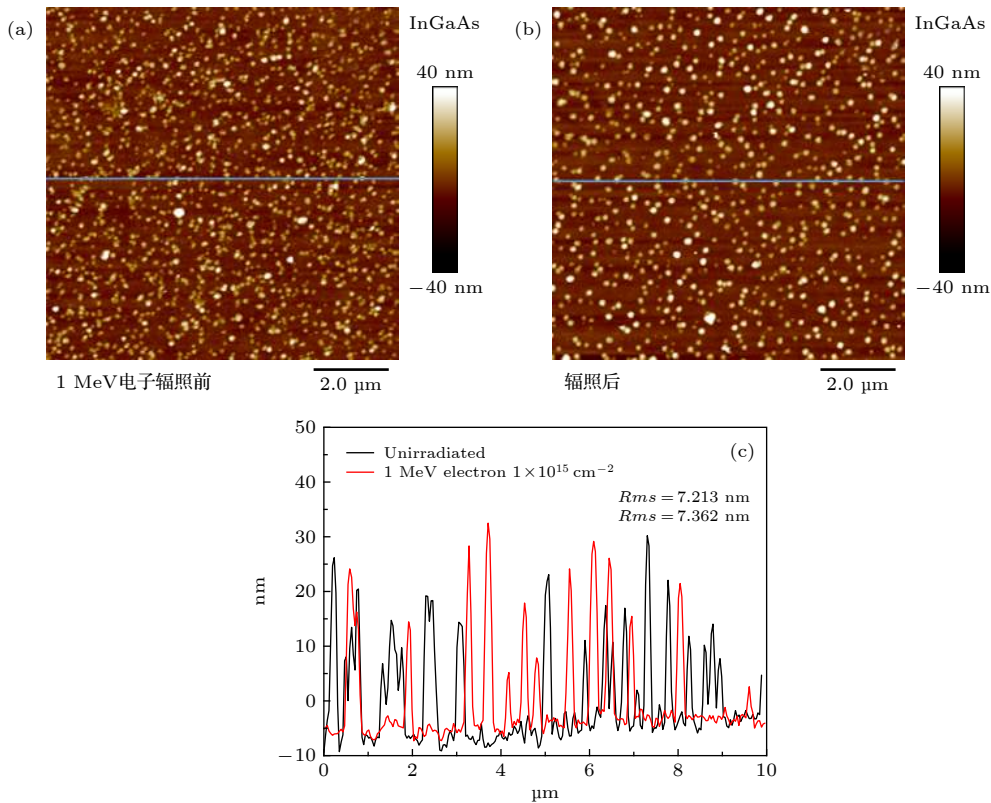


图 4 AFM 测试 1 MeV 电子辐照 InGaAs 子电池前后表面形态及横向剖面对比图 (a) 未辐照子电池; (b) 辐照  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  后子电池; (c) 横向剖面图

Fig. 4. Surface morphology and cross section of InGaAs sub-cell before and after 1 MeV electron irradiation by AFM: (a) The unirradiated sub-cell; (b) the sub-cell after  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  electron irradiation; (c) the cross section comparison.

### 3.1 光性能

不同样品之间具有一定的个体差异, 因此对电性能参数  $P$  进行了归一化处理. 即

$$P = \frac{P_{\text{anneal}}}{P_0}, \quad (1)$$

其中  $P_{\text{anneal}}$  为退火后的电性能参数值;  $P_0$  为辐照后电池参数值.

开路电压  $V_{\text{oc}}$ 、短路电流  $I_{\text{sc}}$  和最大输出功率

$P_{\text{max}}$  是太阳电池最主要的输出参数. 分析太阳电池  $V_{\text{oc}}$ 、 $I_{\text{sc}}$  和  $P_{\text{max}}$  辐照前后和退火过程中的变化规律可以研究其辐照损伤效应和退火效应. 表 1 和表 2 列出两种子电池辐照前后的  $V_{\text{oc}}$ 、 $I_{\text{sc}}$  和  $P_{\text{max}}$  绝对值和剩余率. 辐照后 InGaAs(1.0 eV) 子电池比 InGaAs(0.7 eV) 的  $V_{\text{oc}}$  和  $I_{\text{sc}}$  剩余率分别大 5% 左右,  $P_{\text{max}}$  大 15% 左右. InGaAs(1.0 eV) 子电池的抗辐照性能略好. 辐照过程中,  $V_{\text{oc}}$  的退化程度应小于  $I_{\text{sc}}$  [18–20]. 本文两种子电池的  $V_{\text{oc}}$  退化程度

略大于  $I_{sc}$ . 这是由于样品本征缺陷较多, 导致初始的  $I_{sc}$  较低, 电子辐照缺陷对电池的  $I_{sc}$  退化产生的作用效果降低. InGaAs(0.7 eV) 子电池的 PN 结中具有中性层结构, 结区厚度增加, 缺陷数量增加,

而  $V_{oc}$  的退化主要源自结区. 因此, InGaAs(0.7 eV) 子电池  $V_{oc}$  退化程度更大.

不同退火温度下, 两种 InGaAs 子电池  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$  退火恢复规律如图 5 所示. 可以看出,

表 1 1 MeV 辐照前后 InGaAs(1.0 eV) 子电池的  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$   
Table 1.  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  and  $P_{max}$  of InGaAs(1.0 eV) sub-cells before and after electron irradiated.

InGaAs (1.0 eV)	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/mA$	$P_{max}/mW$
未辐照	0.5089	18.25	7.30
辐照后	0.3093	11.57	3.56
剩余率	60.8%	63.4%	48.8%

表 2 1 MeV 辐照前后 InGaAs (0.7 eV) 子电池的  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$   
Table 2.  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  and  $P_{max}$  of InGaAs (0.7 eV) sub-cells before and after electron irradiated.

InGaAs (0.7 eV)	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/mA$	$P_{max}/mW$
未辐照	0.2529	11.660	1.940
辐照后	0.1428	6.950	0.653
剩余率	56.5%	59.6%	33.7%

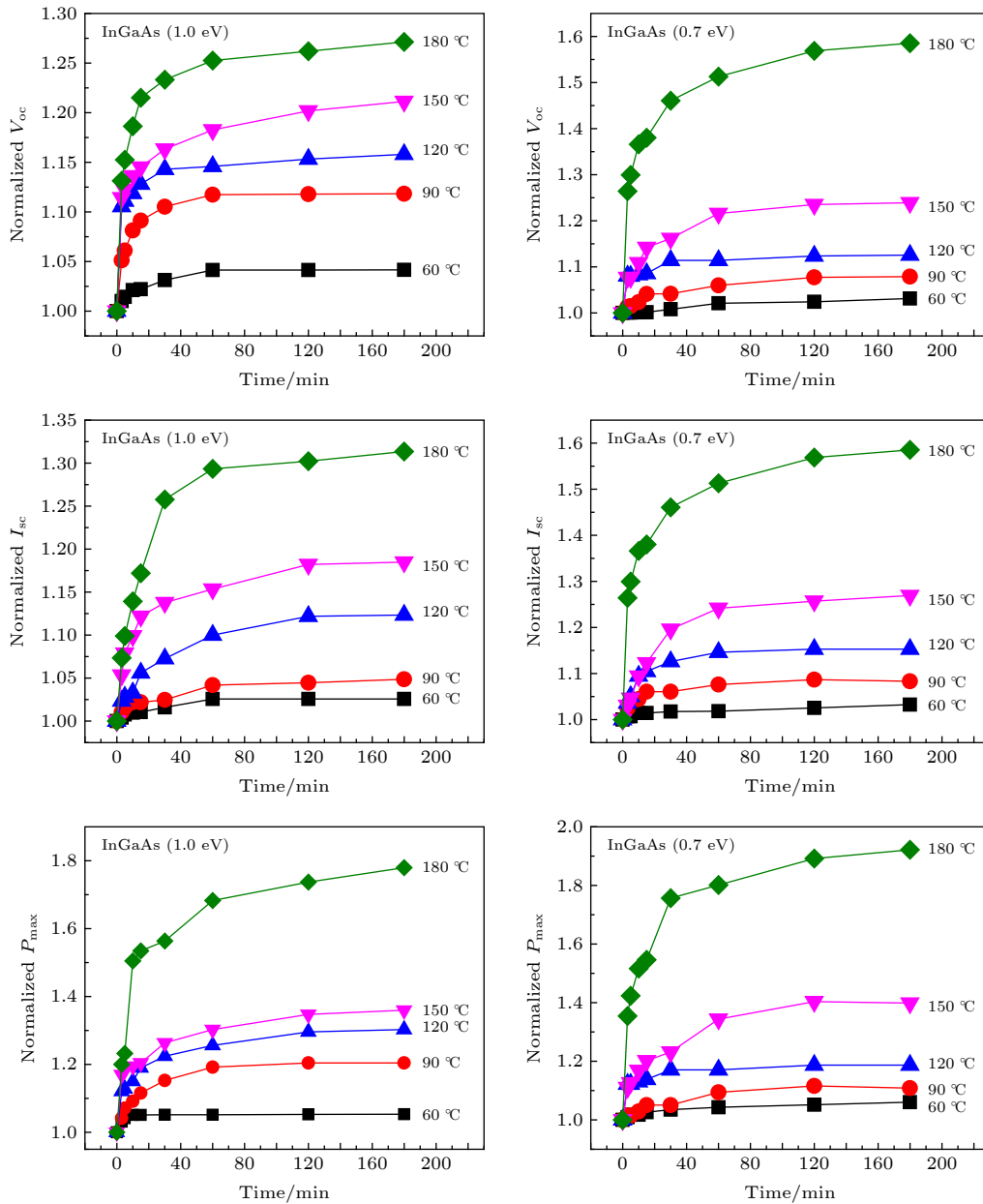


图 5 不同温度退火不同时间下两种 InGaAs 子电池  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$  变化曲线

Fig. 5. Normalized  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  and  $P_{max}$  curves of InGaAs sub-cells anneal at different annealing temperatures for different times.

$V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$  逐渐恢复, 随着退火时间延长, 恢复速度逐渐降低. 退火 60 min 后, 参数基本不再变化, 且退火温度越高, 恢复程度越大. 在退火 60 min 时, 两种子电池  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$  恢复程度均已达到退火 180 min 时的 85% 以上. 当退火温度较低时, 两种子电池的  $V_{oc}$  和  $I_{sc}$  恢复程度均较小. 在较高温度退火下, InGaAs (0.7 eV) 子电池的恢复程度更大. 两种电池的  $P_{max}$  恢复程度大于  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$ , 这是由于  $P_{max}$  的恢复程度与  $I$  和  $V$  乘积有关.

结区对光生载流子的分离作用产生光电流, 而

光生载流子源自结区自身的激发和基区扩散. 对于掺杂浓度较高的太阳电池器件来说, 其结区厚度较薄, 因此基区少子扩散是光电流的主要组成部分. 电子辐照在电池中引入辐照缺陷, 使得少子扩散长度降低,  $I_{sc}$  下降; 而在退火过程中, 辐照缺陷逐渐减少, 少子扩散长度增加,  $I_{sc}$  得以逐渐恢复. 在较低掺杂浓度下, 太阳电池  $V_{oc}$  有如下关系 [21]:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{np}{n_i^2} = \frac{2kT}{q} \ln \frac{n}{n_i}, \quad (2)$$

式中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $q$  为电子电荷量,  $n_i$  为本征载流子浓度,  $n$  为多子浓度. 辐照

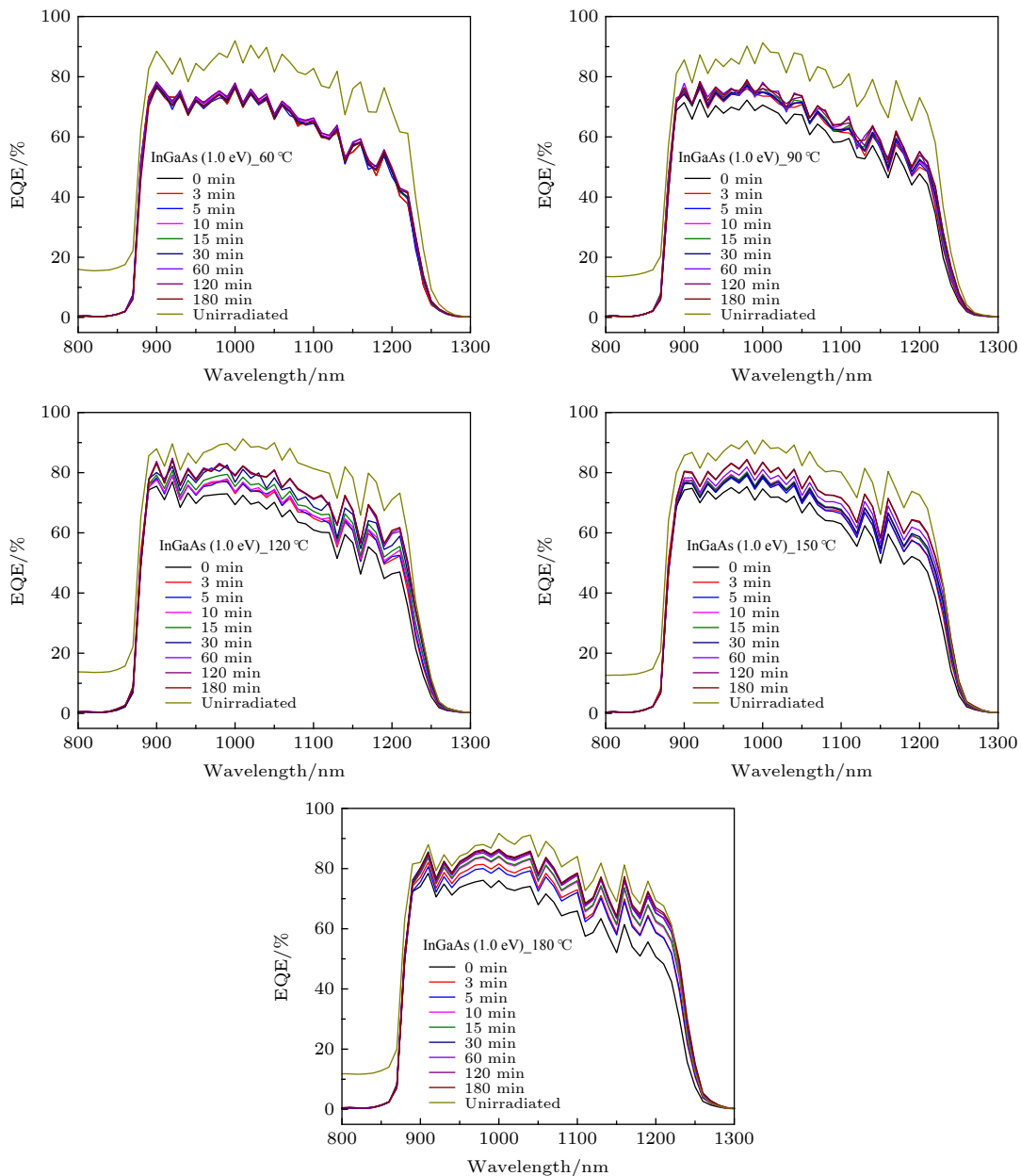


图 6 InGaAs (1.0 eV) 子电池不同温度退火不同时间的 EQE 曲线

Fig. 6. EQE curves of InGaAs (1.0 eV) sub-cells anneal at different annealing temperatures for different times.

缺陷成为俘获中心, 导致  $n$  降低. 在退火过程中, 辐照缺陷数量会逐渐减少, 多子浓度增大, 使得开路电压恢复.

光谱响应测试可以测试太阳能电池将不同波长光子转化为电子的能力, 是太阳能电池光电转化效率的重要测试手段之一. 图 6 和图 7 分别是两种子电池在不同温度退火不同时间的光谱响应曲线. 从图中可以看出, 随着退火时间的延长, 太阳能电池的光谱响应曲线逐渐升高, 这说明太阳能电池光电转化性能逐渐恢复. 从 InGaAs (1.0 eV) 子电池的 EQE 曲线中可以明显地看出, 长波区 EQE 下降程度较大. 太阳能电池对光子的吸收与光子入射深度有

关. 在太阳能电池吸收波长范围内, 短波长光子优先在入射深度较浅的区域激发出光生载流子, 入射深度越大的区域吸收的光子波长越大. 根据太阳能电池结构, N 型区厚度远远小于 P 型区厚度, 长波段光子主要在 P 型区深处被吸收. 在电子辐照产生均匀损伤的前提下, P 型区缺陷数量增加较大. 在 P 型区越深处产生的载流子扩散到结区前被复合的概率越大. 故而在辐照及退火过程中, EQE 曲线长波段相应变化较大. 而对于 InGaAs (0.7 eV) 子电池, 不同波段的 EQE 变化差异性不是很明显, 这是由于 InGaAs (0.7 eV) 子电池样品原生缺陷浓度过高造成的.

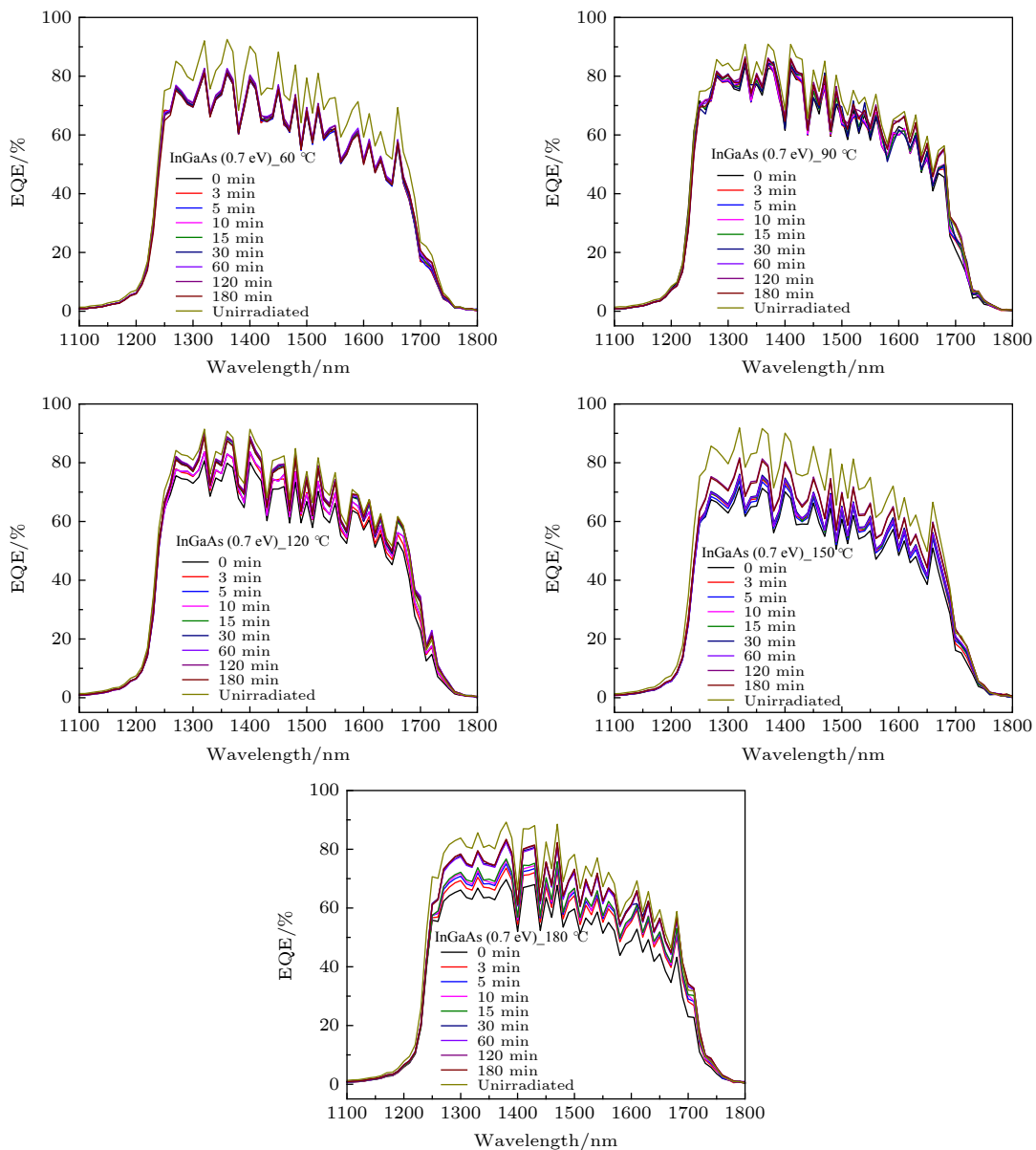


图 7 不同温度退火不同时间的 InGaAs (0.7 eV) 子电池 EQE 曲线

Fig. 7. EQE curves of InGaAs (0.7 eV) sub-cells anneal at different annealing temperatures for different times.



### 3.2 暗特性

太阳能电池是一种典型的肖特基二极管器件, 其暗特性曲线与常规 PN 结  $I-V$  曲线类似. 本文采用双指数模型<sup>[22]</sup>对两种子电池暗特性  $I-V$  曲线进行拟合来分析扩散电流  $I_{s1}$ 、复合电流  $I_{s2}$ 、串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$  在退火过程中的变化. 双指数模型  $I-V$  曲线满足:

$$I_L = I_{s1} \left( \exp \frac{U - I_L R_s}{A_1 U_T} - 1 \right) + I_{s2} \left( \exp \frac{U - I_L R_s}{A_2 U_T} - 1 \right) - \frac{U - I_L R_s}{R_{sh}}, \quad (3)$$

式中  $U_T$  为热电压,  $A_1$  和  $A_2$  为常数. 表 3 和表 4 分别是两种太阳能电池辐照前后拟合所得的  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$ . 高能电子辐照引入辐照缺陷, 使两种 InGaAs 子电池  $R_s$  变大,  $R_{sh}$  变小,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  变大. 其中 InGaAs (1.0 eV) 的  $R_s$  变化程度较 InGaAs (0.7 eV) 变化程度大,  $R_{sh}$  变化相当. 而两种子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  变化程度差异较大, InGaAs (1.0 eV) 子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  分别增大了 178 倍和 155 倍, 而 InGaAs (0.7 eV) 子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  仅增大为 5.19 倍和 5.76 倍. 两种子电池的初始  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  相差  $s$  较为明显, InGaAs (1.0 eV) 的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  比 InGaAs (0.7 eV) 小两个数量级, 这是由于相同温度下样品材料带隙越宽, 热载流子浓度越低, 暗电流越小; 另外太阳能电池的结构和工艺对于反向饱和电流也有影响. 从  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  四个拟合参数的变化上来看, InGaAs (1.0 eV) 子电池的变化程度要大

表 3 辐照前后 InGaAs (1.0 eV) 子电池  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$

Table 3.  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  and  $I_{s2}$  of InGaAs (1.0 eV) sub-cells before and after electron irradiated.

InGaAs (1.0 eV)	$R_s/\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$I_{s1}/A$	$I_{s2}/A$
未辐照	1.5	$4.3 \times 10^4$	$3.6 \times 10^{-7}$	$4.2 \times 10^{-7}$
辐照后	6.2	$5.3 \times 10^3$	$6.4 \times 10^{-5}$	$6.5 \times 10^{-5}$
剩余率	4.13%	0.123%	178%	155%

表 4 辐照前后 InGaAs (0.7 eV) 子电池的  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$

Table 4.  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  and  $I_{s2}$  of InGaAs (0.7 eV) sub-cells before and after electron irradiated.

InGaAs (0.7 eV)	$R_s/\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$I_{s1}/A$	$I_{s2}/A$
未辐照	2.9	$1.3 \times 10^4$	$2.7 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-5}$
辐照后	7.5	$1.4 \times 10^3$	$1.4 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-4}$
剩余率	2.59%	0.108%	5.19%	5.76%

于 InGaAs (0.7 eV), 这说明 InGaAs (1.0 eV) 损伤程度较大. 结合各个参数的变化率, 可以看出  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  的变化更大, 这对应于反向饱和电流的变化更加明显. 经 1 MeV 电子辐照的 InGaAs (1.0 eV) 子电池的反向饱和电流 ( $I_{s1} + I_{s2}$ ) 可以达到其  $I_{sc}$  的 1%, 而 InGaAs (0.7 eV) 子电池的反向饱和电流达到其  $I_{sc}$  的 6%, 这对于太阳能电池的输出能已构成不可忽视的影响, 其损伤的物理机理结合退火恢复机制将在后文中进一步解析.

图 8 是两种 InGaAs 子电池不同温度下退火不同时间暗特性曲线拟合所得  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  的归一化变化曲线图. 可以看出两种 InGaAs 子电池各个暗特性拟合参数均有所恢复, 退火温度越高, 恢复速率越快, 且恢复速率随着时间的延长逐渐减慢. 在退火 60 min 后, 两种子电池的性能参数变化不再明显. 两种子电池的  $R_s$  和  $R_{sh}$  恢复程度相近, InGaAs (1.0 eV) 子电池的  $R_s$  和  $R_{sh}$  恢复程度较 InGaAs (0.7 eV) 子电池略大. 而两种 InGaAs 子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  恢复程度差异较大, InGaAs (1.0 eV) 子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  恢复程度远大于 InGaAs (0.7 eV) 子电池.

$R_s$  主要取决于电池的体电阻, 与整体缺陷浓度有关, 可以用于衡量基区、发射区质量.  $R_{sh}$  反应太阳能电池中的漏电流, 与结区缺陷浓度有关, 用于衡量结区质量. 从样品原始值上看, InGaAs (1.0 eV) 子电池的  $R_s$  小于 InGaAs (0.7 eV) 子电池, 说明 InGaAs (1.0 eV) 子电池本征缺陷数量少于 InGaAs (0.7 eV); InGaAs (1.0 eV)  $R_{sh}$  大于 InGaAs (0.7 eV), 说明 InGaAs (1.0 eV) 的漏电流更小, 结区质量更好. 在辐照过程中, 两种子电池的  $R_s$  增大, 虽然变化比例不同, 但差值相当, 这说明电子辐照引入的缺陷数量基本相当; 两种子电池的  $R_{sh}$  减小, 且两者变化比例相当, 说明损伤程度相近. 在退火过程中,  $R_s$  逐渐减小,  $R_{sh}$  逐渐增大, 这反映了电子辐照引入的缺陷逐渐减少, 漏电流减小. 在 180 °C 退火 180 min 后, 两种子电池的  $R_s$  下降相当, 而  $R_{sh}$  增加程度有差别, 这是由于在并联电阻较大时, 漏电流较小, 考虑到误差问题, 可以认为漏电流恢复程度接近.  $I_{s1}$  产生于耗尽层附近一个少子扩散长度内的载流子复合.  $I_{s2}$  是耗尽层中杂质或辐照中心作为复合中心引起的电流. 在辐照过程中, 两种子电池的耗尽层和结区附近缺陷浓度升高, 复合概率增加,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  均会增大; 在退

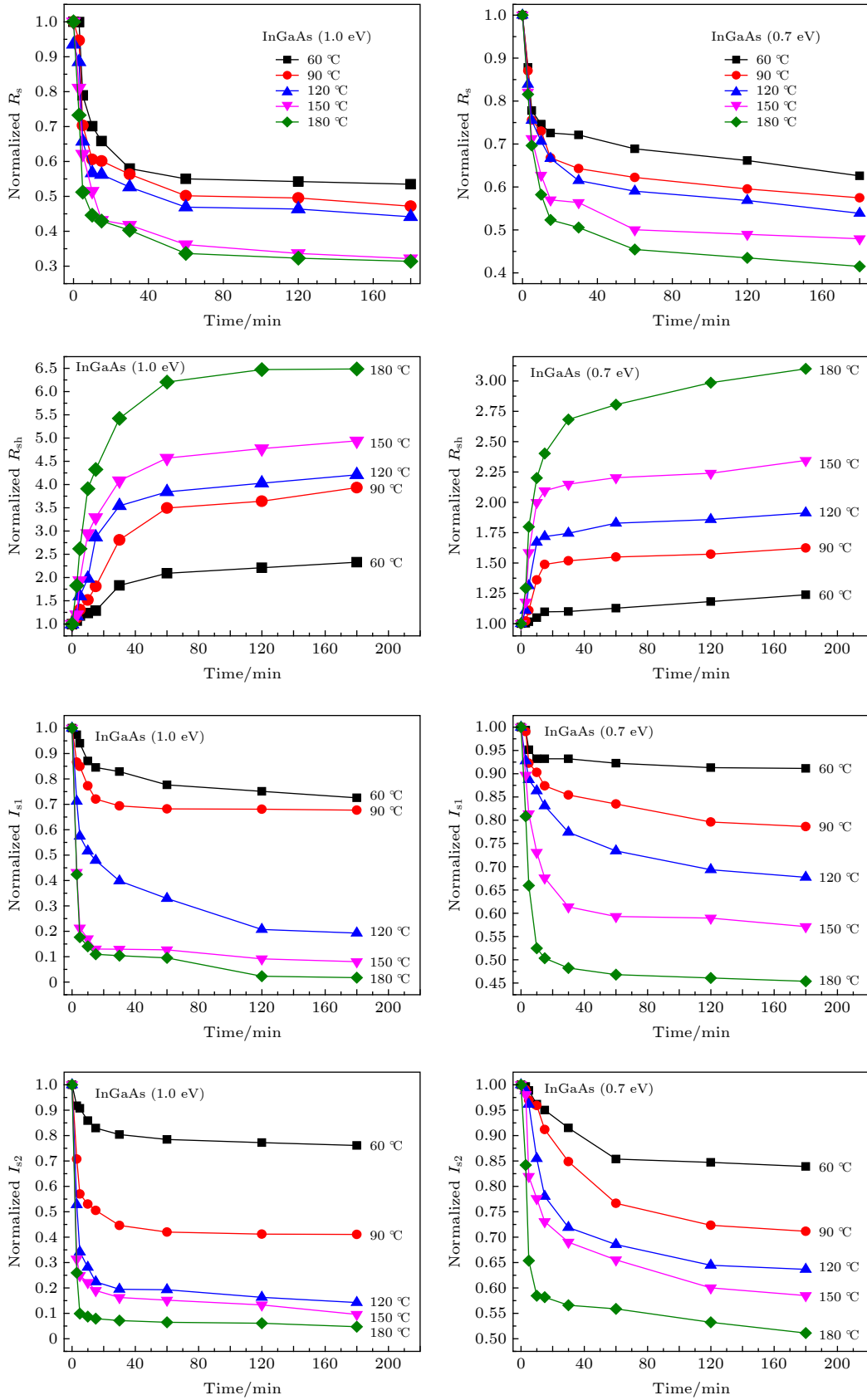


图 8 两种 InGaAs 子电池退火不同时间拟合所得  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  的变化曲线图  
 Fig. 8.  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  and  $I_{s2}$  curves of InGaAs sub-cells annealing at different temperatures.

火过程中, 两种子电池的耗尽层和结区附近缺陷浓度下降, 载流子复合概率减小,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  均会减小. InGaAs (1.0 eV) 子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  变化程度远大于 InGaAs (0.7 eV) 子电池. 由于 InGaAs (0.7 eV) 子电池具有 PIN 结构, 它的结区较厚, 结区附近及结区内部存在本征缺陷数量较多, 由辐照引入的缺陷浓度变化造成的影响将不再明显.

### 3.3 激活能

本文研究的太阳电池热退火激活能是指带电粒子辐照引起的损伤缺陷在恢复过程中所需的最小能量, 这一参数可以反映带电粒子引起的辐射缺陷稳定程度, 另一方面也可以表征不同太阳电池样品辐射缺陷不同温度下的恢复能力. 太阳电池的输出短路电流密度  $J_{sc}$  与缺陷浓度  $N$  有关. 本节建立  $J_{sc}$  与  $N$  的等效模型, 并以此模型计算两种子电池的热退火激活能  $E_a$ .

对于太阳电池  $J_{sc}$  有如下关系:

$$J_{sc} = \phi \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha \sqrt{L}} \right], \quad (4)$$

其中  $\phi$  为入射光子的通量;  $\alpha$  为太阳电池对入射光的吸收系数;  $W$  为 0 偏条件下的空间电荷区宽度;  $L$  为少子扩散长度. 其中  $\phi$  取决于入射光谱,  $\alpha$  与太阳电池材料有关,  $W$  与 P 型材料和 N 型材料的掺杂浓度有关, 对于同类太阳电池样品, 三者均为

固定常数. 因此有:

$$J_{sc\phi}^{-2} - J_{sc0}^{-2} \propto L_\phi - L_0 \propto \sqrt{D\tau_\phi} - \sqrt{D\tau_0}, \quad (5)$$

其中,  $D$  为少数载流子扩散系数,  $\tau$  为少数载流子寿命,  $\phi$  与 0 分别表示辐照前后状态.

太阳电池少数载流子寿命与复合中心  $N_R$  有如下关系:

$$\frac{1}{\tau} = N_R \nu \sigma, \quad (6)$$

其中,  $\nu$  表示少子热运动速度;  $\sigma$  表示少数载流子俘获截面积. 结合 (5) 式和 (6) 式可得:

$$\begin{aligned} N_\phi &= N_{R\phi} - N_{R0} = \frac{\tau_\phi^{-1} - \tau_0^{-1}}{\nu\sigma} \\ &= \frac{D}{\nu\sigma} (L_\phi^{-2} - L_0^{-2}) = B (J_{sc\phi}^{-2} - J_{sc0}^{-2}), \end{aligned} \quad (7)$$

$$N_{\phi\_anneal} = N_{R\_anneal} - N_{R0} = B (J_{sc\_anneal}^{-2} - J_{sc0}^{-2}), \quad (8)$$

其中  $N_\phi$  为电子辐照引入的缺陷浓度,  $N_{R\phi}$  表示电子辐照后复合中心浓度,  $N_{R0}$  表示未辐照的复合中心浓度.  $N_{\phi\_anneal}$  为退火后的缺陷浓度,  $N_{R\_anneal}$  表示退火后复合中心浓度,  $B$  为常数. 两种子电池在辐照及退火过程中的  $J_{sc}$  如表 5 和表 6 所列.

结合 (7) 式和 (8) 式, 将  $N_{\phi\_anneal}$  与  $N_\phi$  作比值, 即得到 (9) 式:

$$\frac{N_{\phi\_anneal}}{N_\phi} = \frac{J_{sc\_anneal}^{-2} - J_{sc0}^{-2}}{J_{sc\phi}^{-2} - J_{sc0}^{-2}}. \quad (9)$$

表 5 辐照及热退火过程中 InGaAs (1.0 eV) 子电池  $J_{sc}$  变化

Table 5.  $J_{sc}$  of InGaAs (1.0 eV) sub-cell in irradiation and thermal annealing.

InGaAs (1.0 eV) 退火温度	未辐照 $J_{sc}/\text{mA}$	退火时间 $J_{sc}/\text{min}\cdot\text{mA}^{-1}$								
		0	3	5	10	15	30	60	120	180
60 °C	13.57	10.26	10.26	10.28	10.29	10.31	10.38	10.41	10.48	10.53
90 °C	13.31	10.19	10.21	10.23	10.28	10.30	10.34	10.39	10.41	10.46
120 °C	13.75	10.41	10.46	10.49	10.57	10.65	10.78	10.79	10.81	10.84
150 °C	13.51	10.31	10.43	10.59	10.84	11.07	11.68	11.73	11.83	11.98
180 °C	13.55	10.38	10.72	10.96	11.46	11.90	12.50	12.67	12.85	12.88

表 6 辐照及热退火过程中 InGaAs (0.7 eV) 子电池  $J_{sc}$  变化

Table 6.  $J_{sc}$  of InGaAs (0.7 eV) sub-cell in irradiation and thermal annealing.

InGaAs (0.7 eV) 退火温度	未辐照 $J_{sc}/\text{mA}$	退火时间 $J_{sc}/\text{min}\cdot\text{mA}^{-1}$								
		0	3	5	10	15	30	60	120	180
60 °C	8.17	6.27	6.27	6.27	6.31	6.32	6.36	6.40	6.45	6.47
90 °C	8.33	6.46	6.47	6.48	6.53	6.53	6.55	6.59	6.63	6.67
120 °C	8.28	6.19	6.21	6.22	6.24	6.28	6.33	6.35	6.42	6.44
150 °C	8.24	6.15	6.18	6.21	6.25	6.29	6.45	6.71	6.79	6.82
180 °C	8.25	6.2	6.25	6.3	6.44	6.51	6.8	7.34	7.59	7.69

(9) 式即为  $N$  与  $J_{sc}$  的等效关系模型. 假设热退火过程中  $N_{\phi\_anneal}$  满足一次反应动力学, 即有:

$$\frac{dN_{\phi\_anneal}}{dt} = -\alpha N_{\phi\_anneal}, \quad (10)$$

结合 (9) 式, 对 (10) 式求解. 得到:

$$\frac{N_{\phi\_anneal}}{N_{\phi}} = \frac{J_{sc\_anneal}^{-2} - J_{sc0}^{-2}}{J_{sc}^{-2} - J_{sc0}^{-2}} = \exp(-\alpha t), \quad (11)$$

其中,  $\alpha$  为缺陷浓度变化系数, 其随着温度的变化满足阿伦尼乌斯公式, 即:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}. \quad (12)$$

对表 5 和表 6 中  $J_{sc}$  按照 (11) 式进行拟合, 即可得到不同退火温度下的  $\alpha$  值, 如表 7 所列.

对 (12) 式两侧同时取对数, 整理后有:

$$\ln\alpha = -\frac{E_a}{kT} + \ln\alpha_0. \quad (13)$$

将表 7 中两种子电池的  $\alpha$  值按照 (13) 式的关

表 7 不同退火温度下 InGaAs (1.0 eV) 和 InGaAs (0.7 eV) 子电池缺陷浓度变化系数  $\alpha$  拟合值

Table 7. Fitting value of the variation defect concentration coefficient( $\alpha$ ) of InGaAs sub-cell at different annealing temperatures.

退火温度	$\alpha$ [InGaAs (1.0 eV)/s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$ [InGaAs (0.7 eV)/s <sup>-1</sup> ]
60 °C	$1.74 \times 10^{-3}$	$1.47 \times 10^{-3}$
90 °C	$4.09 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-3}$
120 °C	$7.33 \times 10^{-3}$	$4.70 \times 10^{-3}$
150 °C	$2.52 \times 10^{-2}$	$7.38 \times 10^{-3}$
180 °C	$5.72 \times 10^{-2}$	$1.82 \times 10^{-2}$

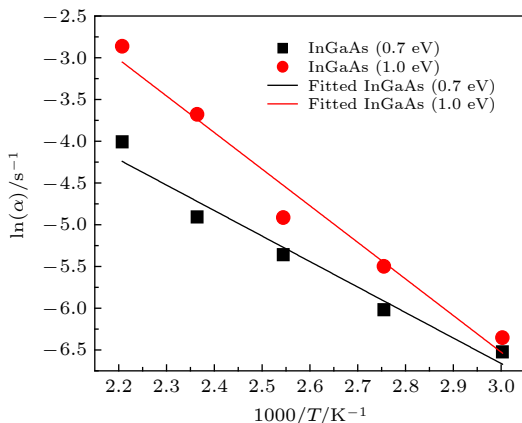


图 9 缺陷浓度变化系数对数  $\ln(\alpha)$  与温度倒数 ( $1/T$ ) 的关系曲线

Fig. 9. Curve of logarithm of the defect concentration change coefficient ( $\ln(\alpha)$ ) with reciprocal of temperature ( $1/T$ ).

系进行拟合, 拟合结果如图 8 所示.

图 9 中拟合曲线的斜率与玻尔兹曼常数  $k$  的积的绝对值即为子电池的热退火激活能  $E_a$ . 通过计算得到, InGaAs (1.0 eV) 子电池热退火激活能为 0.38 eV, InGaAs (0.7 eV) 子电池热退火激活能为 0.26 eV, 说明相同热退火条件下 InGaAs (1.0 eV) 子电池缺陷稳定性更强, 输出性能恢复程度较小, 这也是 3.1 节光性能退火效应结果中 InGaAs (0.7 eV) 子电池  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$  电性能恢复程度更大的根本原因.

## 4 结 论

本文对 1 MeV 电子辐照后的 InGaAs (1.0 eV) 和 InGaAs (0.7 eV) 子电池进行热退火实验. 光  $I-V$  测试表明在热退火过程中  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$  随着时间的延长逐渐恢复, 退火温度越高, 恢复程度越大, 在退火 60 min 后两种子电池的  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  和  $P_{max}$  恢复程度已达到退火 180 min 恢复程度的 85% 以上. 并且相同退火条件下 InGaAs (1.0 eV) 子电池恢复程度小于 InGaAs(0.7 eV) 子电池. 通过对暗特性  $I-V$  双指数模型拟合研究退火过程中  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  在退火过程中的变化规律, 发现  $R_s$ ,  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  在退火过程中逐渐较小,  $R_{sh}$  逐渐增大, 退火温度越高, 变化程度越大. InGaAs (1.0 eV) 子电池的  $I_{s1}$  和  $I_{s2}$  变化程度远大于 InGaAs (0.7 eV) 子电池. 在  $J_{sc}$  和  $N$  等效模型下, InGaAs (1.0 eV) 和 InGaAs (0.7 eV) 子电池的  $E_a$  分别为 0.38 和 0.26 eV.

## 参考文献

- [1] Asim N, Sopian K, Ahmadi S, Saeedfar K, Alghoul M A, Saadatian O, Zaidi S H 2012 *Renewable Sustainable Energy Rev.* **16** 5834
- [2] Imaizumi M, Kawakita S, Sumita T, Takamoto T, Ohshima T Yamaguchi M 2005 *Prog. Photovoltaics* **13** 529
- [3] France R M, Geisz J F, García I, Steiner M A, McMahon W E, Friedman D J, Moriarty T E, Osterwald C, Ward J S, Duda A, Young M, Olavarria W J 2015 *IEEE J. Photovoltaics* **5** 432
- [4] Song M H, Wang D X, Bi J F, Chen W J, Li M Y, Li S L, Liu G Z, Wu C Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 188801 (in Chinese) [宋明辉, 王笃祥, 毕京锋, 陈文浚, 李明阳, 李森林, 刘冠洲, 吴超瑜 2017 *物理学报* **66** 188801]
- [5] Tatavarti R, Wibowo A, Martin G, Tuminello F, Youtsey C, Hillier G, Pan N 2010 IEEE 35 th Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, Hawaii, USA, June 20–25, 2010 p2125
- [6] Lu J Y, Tan M, Yang W X, Lu S L, Zhang W, Huang J 2016

- Semicond. Optoelectron.* **37** 688 (in Chinese) [卢建娅, 谭明, 杨文献, 陆书龙, 张玮, 黄健 2016 半导体光电 **37** 688]
- [7] Boisvert J, Law D, King R, Rehder E, Chiu P, Bhusari D, Fetzer C, Liu X, Hong W, Mesropian S, Woo R, Edmondson K, Cotal H, Krut D, Singer S, Wierman S, Karam N H 2013 *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference* Tampa, Florida, USA, Jun 16–21, 2013 p2790
- [8] Zhang Y Q, Huo M X, Wu Y Y, Sun C Y, Zhao H J, Geng H B, Wang S, Liu R B, Sun Q 2017 *Chin. Phys. B* **26** 088801
- [9] Loo R, Knechtli R C, Kamath G S 1978 *IEEE 13th Photovoltaic Specialists Conference* Washington DC, USA, Jun 5, 1978 p562
- [10] Loo R Y, Kamath G S, Li S S 1990 *IEEE Trans. Electron Devices* **37** 485
- [11] Loo R Y, Kamath G S 1980 *IEEE 14th Photovoltaic Specialists Conference* San Diego, California, USA, January 7–10, 1980 p1087
- [12] Heinbockel J H, Conway E J, Walker G H 1980 *IEEE 14th Photovoltaic Specialists Conference* San Diego, California, USA, January 7–10, 1980 p1085
- [13] Walker G H, Conway E J 1978 *J. Electrochem. Soc.* **125** 676
- [14] 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]
- [15] Xiang X B, Du W H, Liao X B, Chang X L 2001 *Chin. J. Semicond.* **22** 710
- [16] Yamaguchi M, Okuda T, Taylor S J, Takamoto T, Ikeda E, Kurita H 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 1566
- [17] Sasaki T, Arafune K, Metzger W, Romero M J, Jones K, Tassim M A, Ohshita Y, Yamaguchi M 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** 936
- [18] Angelis N D, Bourgoin J C, Takamoto T, Khan A, Yamaguchi M 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **66** 495
- [19] Bourgoin J C, Zazoui M 2002 *Semicond. Sci. Technol.* **17** 453
- [20] Bourgoin J C, Angelis N D 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **66** 467
- [21] Amekura H, Kishimoto N, Saito T 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 4984
- [22] Kaminski A, Marchand J J, Fave A, Laugier A 1997 *IEEE 26th Photovoltaic Specialists Conference* Anaheim, California, USA, September 29–October 3, 1997 p203

# Thermal annealing effects of InGaAs (1.0 eV) and InGaAs (0.7 eV) sub-cells of inverted metamorphic four junction (IMM4J) solar cells under 1 MeV electron irradiation\*

Zhang Yan-Qing<sup>1)</sup> Qi Chun-Hua<sup>1)†</sup> Zhou Jia-Ming<sup>2)</sup> Liu Chao-Ming<sup>1)2)‡</sup>  
 Ma Guo-Liang<sup>1)</sup> Tsai Hsu-Sheng<sup>1)</sup> Wang Tian-Qi<sup>1)3)</sup> Huo Ming-Xue<sup>1)</sup>

1) (*Space Environment Simulation and Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

3) (*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

( Received 15 April 2020; revised manuscript received 7 July 2020 )

## Abstract

In this work, thermal annealing effects of InGaAs (1.0 eV) and InGaAs (0.7 eV) sub-cells for inverted metamorphic four junction (IMM4J) solar cells after being irradiated by 1 MeV electrons are investigated by using light  $I$ - $V$  characteristic, dark  $I$ - $V$  characteristic and spectral response. Annealing temperature range is 60–180 °C and annealing time is 0-180 min. The results indicate that the open-circuit voltage  $V_{oc}$ , short-circuit current  $I_{sc}$ , and maximum power  $P_{max}$  of two sub-cells are gradually recovered with annealing time increasing, and the rate of recovery increases with annealing temperature increasing. Besides, the recovery rate of InGaAs (1.0 eV) sub-cell is less than that of InGaAs (0.7 eV) sub-cell under the same annealing temperature and time. Double exponential model is used to fit the dark  $I$ - $V$  curve for the key parameters (the serial resistant  $R_s$ , the parallel resistant  $R_{sh}$ , the diffusion current  $I_{s1}$  and the recombination current  $I_{s2}$ ). It is found that  $R_s$ ,  $I_{s1}$  and  $I_{s2}$  of two sub-cells decrease gradually and  $R_{sh}$  increases during annealing and the rate of recovery increases with annealing temperature rising. However, the recovery of  $I_{s1}$  and  $I_{s2}$  of InGaAs(1.0 eV) are much greater than that of InGaAs(0.7 eV). The equivalent model between short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) and defect concentration ( $N$ ) induced by irradiation and annealing is established.  $N$  changes follow the first reaction kinetics, and the rate constant follows the Arrhenius equation with the annealing temperature. Therefore, the thermal annealing activation energy of InGaAs(1.0 eV) and InGaAs(0.7 eV) sub-cells are 0.38 eV and 0.26 eV, respectively. These efforts will contribute to the IMM4J solar cells, in particular, to space-based applications.

**Keywords:** inverted metamorphic four junction solar cells, electron irradiation, annealing effects, activation energy of thermal annealing

**PACS:** 88.40.jp, 88.40.H-, 88.40.fh

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200557

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11805045, 61704039, 61771167, 11775061), the State Key Laboratory for Environmental Simulation and Effects of Intense Pulsed Radiation, China (Grant Nos. SKLIPR2015, SKLIPR1912), and the Research and Innovation Fund of Harbin Institute of Technology, China (Grant Nos. HIT.NSRIF.2019007, HIT.NSRIF.20190028).

† Corresponding author. E-mail: [qichunhua@hit.edu.cn](mailto:qichunhua@hit.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [cnliu@hit.edu.cn](mailto:cnliu@hit.edu.cn)