

基于布拉格反射器的 GaInP/Ga(In)As/Ge 三结太阳能电池电子辐照性能

颜平远¹, 涂洁磊^{1*}, 艾尔肯·阿不都瓦衣提¹, 张炜楠¹, 李雷¹, 胡凯¹, 雷琪琪²

¹ 云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650500;

² 中国科学院新疆理化技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要 为获得包含布拉格反射器的太阳能电池在电子辐照下的退化规律与机制, 利用光学膜系软件 Macleod 设计出适用于晶格失配的 GaInP/Ga(In)As/Ge 三结太阳能电池的布拉格反射器结构, 并对嵌入该结构的三结太阳能电池开展 1 MeV 的高能电子辐照实验, 最后结合数值拟合方法对电池电学性能的退化进行了详细分析。结果表明: 在布拉格反射器结构区域, 最高反射率的理论值与实验值基本相符; 随着辐照剂量增大, 三结电池各项电学参数的退化越发严重, 短路电流退化率大于开路电压, 三结电池在长波方向的外量子效率(EQE)退化逐渐严重, 并且子电池 Ge 短路电流的退化率大于其他子电池; 在相同的辐照条件下, 随着辐照剂量增大, 布拉格反射器结构带宽区域的最高反射率逐渐衰减, 但在辐照剂量低于 $2 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$ 时仍能提升短路电流, 说明布拉格反射器结构对抗辐照具有积极作用。

关键词 薄膜; 电子辐照; 太阳能电池; 布拉格反射器; 电学参数;

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1631001

Electron Irradiation Performance of GaInP/Ga(In)As/Ge Triple Junction Solar Cell Based on Bragg Reflector

Yan Pingyuan¹, Tu Jielei^{1*}, Aierken Abuduwayiti¹, Zhang Weinan¹,
Li Lei¹, Hu Kai¹, Lei Qiqi²

¹ Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

² Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences,
Urumqi, Xinjiang 830011, China

Abstract To obtain the degradation ruler and mechanism of the solar cell containing distributed Bragg reflectors (DBR) at electron irradiation, Macleod software was used to design suitable DBR for upright metamorphic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cell, and 1 MeV electron irradiation experiment was carried out on the solar cell. At last, the electrical properties degradation was analyzed by the method of mathematically fitting. The results show that the theoretical highest reflectance is basically consistent with the experimental value. With the increase of irradiation fluence, the electrical parameters deteriorate is seriously and the degradation rate of short-circuit current is larger than that of open-circuit voltage, the external quantum efficiency degradation of the solar cell in long wavelength is gradually serious, and the degradation rate of short-circuit current in the Ge sub-cell is larger than that of other sub-cells. With the increase of irradiation influence, the maximum reflectance of the DBR gradually degrades in bandwidth area under the same irradiation condition, but the short-circuit current can still be improved when the irradiation fluence is less than $2 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$, showing that the DBR has positive effects on anti-irradiation.

Key words thin films; electron irradiation; solar cell; Bragg reflector; electrical parameter

OCIS codes 310.4165; 310.6805; 350.6050

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-04-24; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61664010)

* E-mail: tjli@ynnu.edu.cn

1 引 言

空间太阳能电池是航天器的直接能源提供者,它的抗辐照性能影响着空间飞行器的在轨寿命。因此,为了保证航天器的性能稳定以及可靠运行,研发出光电转换效率高、抗辐射能力强且运行稳定的空间太阳能电池具有重要意义。

目前,正在空间服役的晶格匹配(LM)GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池一直是空间电池的首选^[1],但是由于Ge底电池的光电流过大,不能充分利用光谱,光电转换效率很难进一步提高。而正向晶格失配(UMM)GaInP/Ga(In)As/Ge三结太阳能电池通过引入渐变缓冲层实现了晶格失配材料的生长,将底电池Ge的冗余电流密度减小了近20%,并实现子电池间的良好电流匹配^[2-3],不仅转换效率高,而且制备成本低。因此,UMM3J电池有望成为未来空间电池工程化应用的主要选择之一。

在复杂的空间环境中,太阳电池因暴露在不同类型的带电粒子下而会发生电学性能的退化^[4],因此,有必要对太阳电池的辐照效应及退化机理进行研究。国外Spectrolab公司研发出了高效的UMM3J电池,并开展了电子辐照实验,实验结果表明,UMM3J电池在低温条件下具有线性退化行为^[5]。李占行等^[6]对LM3J电池和UMM3J电池开展1 MeV电子辐照效应实验,结果表明:在*I-V*(电流-电压)特性方面,LM3J电池的退化小于UMM3J电池;在光谱响应方面,LM3J电池中顶电池的退化大于UMM3J电池,中电池的退化小于UMM3J电池。Heini等^[7]研究了UMM3J电池的电子辐照效应,结果表明,GaInAs的电池光谱响应退化比GaInP顶电池更严重,并且GaInP顶电池基区减薄后有较高的抗辐照能力。

目前,在针对空间电池开展的抗辐照加固设计中,生长布拉格反射器(DBR)是一种高效可行的办法^[8],这种结构在光电器件在宽频谱内具有高的反射性能,并已得到了广泛应用^[9-10]。常晓阳等^[11]验证了LM3J电池在添加DBR结构后抗辐照能力明显提升。马大燕等^[12]对包含DBR结构的LM3J电池厚度进行优化,并分析了该电池在辐照前后的电学性能,结果表明,DBR结构能够明显改善电流的辐照衰减。

目前,针对UMM3J电池的DBR结构进行设计,并验证其抗辐照能力的研究鲜有报道。因此,本文以晶格失配的GaInP/Ga(In)As/Ge三结太阳电

池作为研究对象,借助光学膜系软件Macleod和数值拟合方法对DBR结构进行设计,并对太阳电池电学性能的退化进行详细分析,为进一步验证DBR结构的抗辐照性能提供理论依据。

2 DBR 设计

DBR是由多层高、低折射率材料交替组成的周期性结构^[13-14]。当太阳光射入这些不同折射率的材料对时,各膜层界面反射的光在满足光学干涉条件时就会形成反射光,即每层材料的光学厚度 d 为中心反射波长的 $1/4$,此时高、低折射率材料膜层厚度 t_H 和 t_L 满足(1)式^[15],当反射光束中相邻两光束的相位差为 π 时,反射最强。

$$\begin{cases} t_H = \lambda_0 / (4n_H) \\ t_L = \lambda_0 / (4n_L) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: λ_0 为中心波长; n_H 为高折射率材料的折射率; n_L 为低折射率材料的折射率。设前后接触层的折射率分别为 n_0 和 n_s , m 为高低折射率材料周期对数,对应中心波长 λ_0 的反射率满足(2)式,高反射带宽 $\Delta\lambda$ 满足(3)式^[11-12],即:

$$r = \left[\frac{n_0 - (n_H/n_L)^{2m} (n_H^2/n_s)}{n_0 + (n_H/n_L)^{2m} (n_H^2/n_s)} \right]^2, \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right). \quad (3)$$

因此,DBR结构的高反射带宽 $\Delta\lambda$ 与高、低膜系材料的折射率有关,具体表现为折射率差值越大,DBR结构的带宽越宽。

根据UMM3J电池中各子电池的波长响应范围,拟定DBR结构在中心波长910 nm处有最高反射率,并且高反射带宽在中电池Ga(In)As的波长响应区域内,如此便能相对提高电池中的短路电流。常用的DBR材料对为高低膜系组合 $Al_xGa_{1-x}As/Al_{1-x}Ga_xAs$,因此结合UMM3J电池外延结构参数,分别导入所需材料的折射率与消光系数,并设定如下条件:垂直入射,参考中心波长为910 nm,每层材料的光学厚度(FWOT)为0.25,物理厚度与中心波长相对应,入射介质设定为中电池中的GaAs材料,出射介质设定为隧穿结以及缓冲层中的GaAs材料。批量计算GaAs/AlAs材料对在中心波长910 nm处的预期反射率。

图1给出不同Al组分、不同周期对数的 $Al_xGa_{1-x}As/Al_{1-x}Ga_xAs$ 结构在中心波长910 nm处的最高反射率,可以看出:GaAs/AlAs材料对的反射率与 $Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 材料对的差距

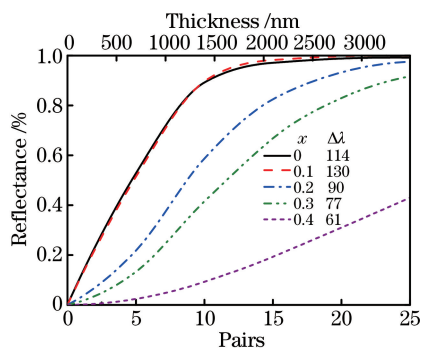


图 1 不同 Al 组分和不同周期对数的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 的反射率

Fig. 1 Reflectance of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ for various values of Al component and pairs

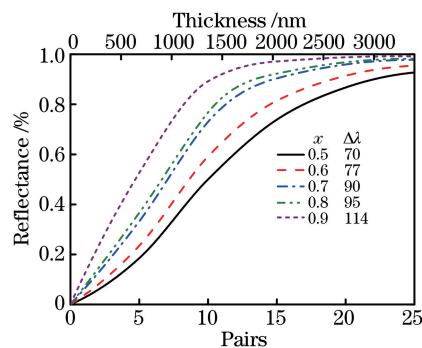


图 2 不同 Al 组分和不同周期对数的 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的反射率

Fig. 2 Reflectance of $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ for various values of Al component and pairs

很小,且前者的带宽为 114 nm,稍小于 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 材料对的带宽。除此之外,在相同的周期对数下,随着 Al 组分增加,由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 材料对组成的 DBR 结构的反射率逐渐降低,高反射带宽也逐渐降低;周期对数越大,反射率越高,DBR 结构厚度越大。当 DBR 结构的周期对数大于 10 时, GaAs/AlAs 材料对的反射率较 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 材料对的略小,完全满足高反射率的要求。

因此,将 GaAs 固定为高折射率材料,批量计算 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料对的反射率随 Al 组分以及周期对数的变化。从图 2 中可以看出,随着 Al 组分增加,由 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料对组成的 DBR 结构的反射率逐渐增加,高反射带宽也逐渐增大;周期对数越大,反射率越高。因此,最终选用 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 材料对。计算得到了 GaAs 与 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 膜层材料在中心波长 910 nm 处的折射率分别为 3.59 和 2.98,对应膜层的厚度分别为 63.44 nm 和 76.25 nm。结合生长工艺选定 16 对生长周期的 DBR 结构,此时其理论最高反射率为 95.83%。

3 实验过程

实验样品为 UMM3J 太阳电池。采用德国 AIXTRON 公司生产的 2800G4 型设备通过金属有机化合物气相沉积法(MOCVD)制备 UMM3J 太阳电池,在 4 英寸(1 英寸=2.54 cm)P 型 Ge 衬底上进行生长,以砷烷(AsH_3)、磷烷(PH_3)、三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)和三甲基铟(TMIIn)作为生长源,硅烷(SiH_4)、二乙基锌(DEZn)和四溴化碳(CBr_4)分别作为 N 型和 P 型掺杂源,氢气作

为载气。

电池的基本结构如图 3 所示,16 对 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 材料组成的 DBR 结构在 $\text{Ga}(\text{In})\text{As}$ 中电池的下方,隧穿结的上方,电池尺寸为 3 cm×4 cm。

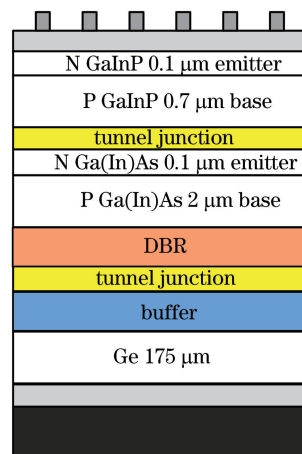


图 3 $\text{GaInP}/\text{Ga}(\text{In})\text{As}/\text{Ge}$ UMM3J 太阳电池结构
Fig. 3 Structure of $\text{GaInP}/\text{Ga}(\text{In})\text{As}/\text{Ge}$ UMM3J solar cell

高能电子辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所的 ELV-8 电子加速器上完成,实验环境为室温,电子能量选取 1 MeV,辐照通量选取 $1 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,辐照注量分别选取 1×10^{15} , 2×10^{15} , $5 \times 10^{15} \text{ e}/\text{cm}^2$ 。在室温和 AM0 条件下测试辐照前后太阳电池的 I - V 特性曲线,光谱响应测试扫描波长为 300~1800 nm,分光光度计扫描波长为 200~1800 nm。

4 结果与分析

4.1 DBR 结构仿真与实验对比

在实验样品 UMM3J 太阳电池的制备过程中,外延生长 DBR 结构形成外延片,在外延片上蒸镀金

属电极、减反射膜等,这样便制成了太阳电池芯片。本文使用分光光度计分别测试外延片以及太阳电池芯片的表面反射率,并将其与仿真得到的 DBR 结构区域的最高反射率进行对比。

如图 4 所示,仿真所得 DBR 结构在 910 nm 处的反射率高达 95.83%,测量所得 UMM3J 电池外延片的 DBR 结构在 906 nm 处的最高反射率为 95.45%,测量所得 UMM3J 太阳电池芯片的 DBR 结构在 914 nm 处的最高反射率为 92.9%。DBR 结构的作用是将对应高反射带宽波段内的反射率整体提高。此外,仿真得到的最大反射率与测量值基本相符,说明 DBR 结构最高反射率的仿真结果与测量结果具有较高的吻合度。

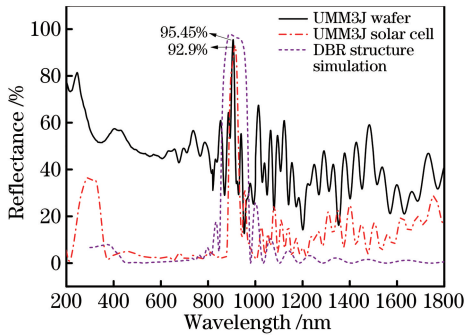


图 4 仿真与测量得到的 UMM3J 电池中 DBR 结构的反射率
Fig. 4 Simulated and measured reflectance of DBR structure in UMM3J solar cell

4.2 I-V 特性曲线的退化规律

I-V 特性曲线可以直观地反映太阳电池的电学

表 1 不同电子辐照剂量下 UMM3J 电池的电学参数

Table 1 Electrical parameters of UMM3J solar cell at different electron irradiation fluences

Electron fluence / (e · cm ⁻²)	V _{oc} /V	I _{sc} /A	P _{max} /W	FF	E _{ff}	I _{ph} /mA	I ₀ /A	n	R _s /Ω	R _{sh} /Ω
0	2.63	0.157	0.326	0.789	28.14	13.05	7.37×10 ⁻⁸	1.74	17.75	20000
1×10 ¹⁵	2.43	0.142	0.272	0.788	24.08	11.71	6.86×10 ⁻⁸	1.83	18.08	5675
2×10 ¹⁵	2.35	0.137	0.253	0.783	21.73	11.32	5.58×10 ⁻⁷	1.85	18.29	3857
5×10 ¹⁵	2.3	0.13	0.227	0.76	19.57	10.51	1.02×10 ⁻⁷	1.86	20.40	2625

除了五种常见的电学参数外,还可以通过太阳电池二极管等效电路理论模型^[17]拟合 I-V 曲线提取其他的电学参数。在恒定的光照条件下,电流 I 输出方程为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (4)$$

式中:I_{ph} 为光生电流;I₀ 为反向饱和电流;n 为理想因子;R_{sh} 为并联电阻;R_s 为串联电阻;V_T 为热电压。

拟合得到的 I-V 曲线如图 5 中所示,可以看出

性能参数:开路电压 V_{oc},短路电流 I_{sc},光电转换效率 E_{ff},最大功率 P_{max} 以及填充因子(FF)。图 5 所示为 UMM3J 太阳电池在 1 MeV 高能电子和不同辐照剂量下的 I-V 特性曲线。

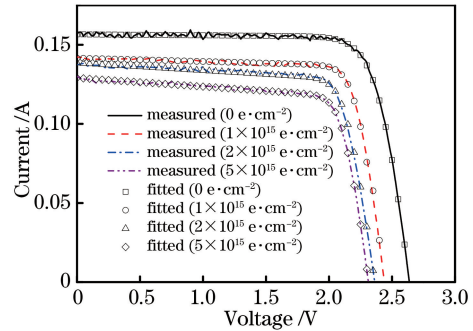


图 5 不同辐照剂量下 UMM3J 太阳电池的 I-V 曲线
Fig. 5 I-V curves of UMM3J solar cell at different irradiation fluences

从图 5 可以看出,随着电子辐照剂量增加,UMM3J 电池的五种电学性能参数均退化得越来越严重,具体数值如表 1 所示。主要原因是电子辐照使电池材料内部产生了缺陷,从而对载流子产生了影响。辐照剂量越大,缺陷数目越多,最终导致电学参数的退化越严重。短路电流 I_{sc} 的退化主要是因为电子辐照使基区和发射区产生的缺陷成为非辐射复合中心,光生电子空穴对来不及到达结区就已快速复合^[16],导致短路电流 I_{sc} 急剧减小。开路电压 V_{oc} 和最大功率 P_{max} 的退化主要是因为 PN 结区缺陷数量增多,反向饱和电流增加。

实验结果与拟合结果吻合良好。拟合结果的具体数值也在表 1 中给出,可以发现:随着电子辐照剂量增加,光生电流 I_{ph} 和并联电阻 R_{sh} 逐渐减小。光生电流 I_{ph} 与载流子的输运有关,R_{sh} 与开路电压有关。辐照产生的内部缺陷不仅降低了载流子的输运能力,还使开路电压发生退化。此外,随着电子辐照剂量增加,反向饱和电流 I₀、理想因子 n 和串联电阻 R_s 逐渐增大。这是因为辐照诱发的缺陷会直接导致反向饱和电流增大;辐照诱发缺陷后,缺陷增多,因此串联电阻变大。n 是用于评估电池内部 PN

结工艺质量与复合类型的参数,其值大说明 PN 结内部主要是直接复合。

为进一步观察 UMM3J 电池电学性能的退化幅度,将不同电子辐照剂量下的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和最大功率 P_{max} 等电学参数进行归一化处理,结果如图 6 所示。根据主要参数 V_{oc} 、 I_{sc} 和 P_{max} 的归一化结果与辐照剂量之间存在的数学关系满足对数方程退化模型方程^[18],可以拟合得到退化参数,如表 2 所示。对数方程退化模型方程为

$$p = 1 - c_p \lg(1 + \varphi/\varphi_{0p}), \quad (5)$$

式中: p 为电学性能归一化参数; c_p 为电学性能退化率; φ 为电子辐照剂量; φ_{0p} 为临界剂量。当辐照剂量大于临界剂量时,电学性能参数的归一化值与辐照剂量的对数成线性关系;当辐照剂量远小于临界剂量时,电学性能参数归一化值与辐照剂量成线性关系。因此,可以对拟合得到的退化参数进行进一步分析。

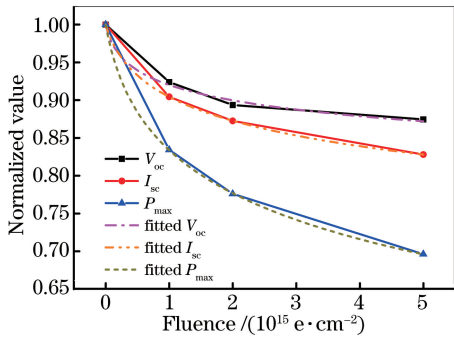


图 6 不同辐照剂量下,UMM3J 太阳电池电学性能的归一化曲线

Fig. 6 Normalized electrical performance curves of UMM3J solar cell at different electron irradiation fluences

表 2 UMM3J 太阳电池主要参数的退化情况

Table 2 Degradation of main parameters of UMM3J solar cell

Parameter	c_p	$\varphi_{0p} / (e \cdot cm^{-2})$
V_{oc}	0.0713	8.31×10^{13}
I_{sc}	0.1193	1.87×10^{14}
P_{max}	0.217	2.07×10^{14}

从图 6 可以看出,随着电子辐照剂量增加,UMM3J 太阳电池开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和最大功率 P_{max} 的退化幅度增大,并且退化曲线与实验值拟合良好。由表 2 可以看出:最大功率 P_{max} 退化得最严重,这与开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 退化幅度的乘积有关;短路电流 I_{sc} 的退化率和退化临界剂量均大于开路电压 V_{oc} 的退化率和退化临界剂量,即辐照产生的缺陷直接影响电池的短路电流,符

合传统太阳电池的退化规律。

4.3 光谱响应曲线退化规律

为了分析不同辐照剂量下 UMM3J 太阳电池中各子电池对应的外量子效率(EQE)的变化趋势,本文对光谱响应曲线进行了测试,并对各子电池所对应的短路电流密度进行了计算。

图 7 为 UMM3J 电池在不同辐照剂量下的 EQE 曲线,可以看出:随着电子辐照剂量增加,GaInP 顶电池 EQE 曲线的退化幅度不明显,说明 GaInP 子电池具有良好的抗辐照性能;在 820~880 nm 处,辐照前中电池 Ga(In)As 的 EQE 曲线有明显上升的趋势,原因是 DBR 结构在高反射带宽区域将入射光反射回有源区内进行二次吸收,相对提升了中电池的短路电流;随着电子辐照剂量增加,Ga(In)As 中电池的 EQE 曲线总体上呈现退化趋势。此外,由图 7 还可以看出:在 820~880 nm 区域,当辐照剂量为 $2 \times 10^{15} e/cm^2$ 时,DBR 结构仍能响应并起到提升一部分电流密度的作用;当辐照剂量为 $5 \times 10^{15} e/cm^2$ 时,EQE 呈现急剧退化趋势。这是由于基区较厚,在累积一定的辐照剂量后,基区诱发的缺陷数目急剧增大,使得基区底部产生的光生载流子易被俘获,而基区底部主要对应吸收长波段的光子,因此表现为子电池的光谱响应在其长波方向的衰减较为严重,同时也会影响到 Ga(In)As 子电池将反射光充分吸收并转化为电流的能力。当累积剂量为 $1 \times 10^{15} e/cm^2$ 时,Ge 底电池 EQE 退化得不明显,而辐照剂量大于 $1 \times 10^{15} e/cm^2$ 后,退化幅度逐渐变大,这主要是因为电池活性区内产生的位移损伤缺陷密度随着电子辐射剂量的增加而增大。通常采用位移损伤计量法对电池内部产生的位移损伤值 D_d 进行分析^[19-20]。位移损伤值的表达式为

$$D_d = \alpha_{NIEL} \times \varphi, \quad (6)$$

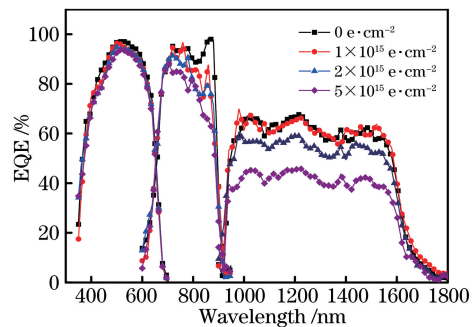


图 7 不同辐照剂量下 UMM3J 太阳电池的 EQE 曲线
Fig. 7 EQE curves of UMM3J solar cell at different irradiation fluences

式中： φ 为辐照注量； α_{NIEL} 为带电粒子在电池材料中产生的非电离能量损失。采用 Mulassis 仿真程序可以计算得到电子入射在 UMM3J 电池中产生的 D_d 。粒子设定项包括入射粒子类型(电子)、能量(1 MeV)、入射方式(垂直入射)、注量(取上述实验中的三种剂量)、仿真粒子数目(10000)；结构设定项包括各层材料结构的类型、厚度；分析参数设定项包括总电离剂量与总非电离剂量(二者均为不同材料接触界面处的能量沉积)。

仿真结果如表 3 所示。从表 3 中可以发现,随着辐照注量增加, D_d 值逐渐增大。这一结果说明三结电池长波方向的子电池 Ge 的光谱响应曲线退化得最严重,退化幅度最大。

图 8 为 UMM3J 电池中各子电池对应的短路电

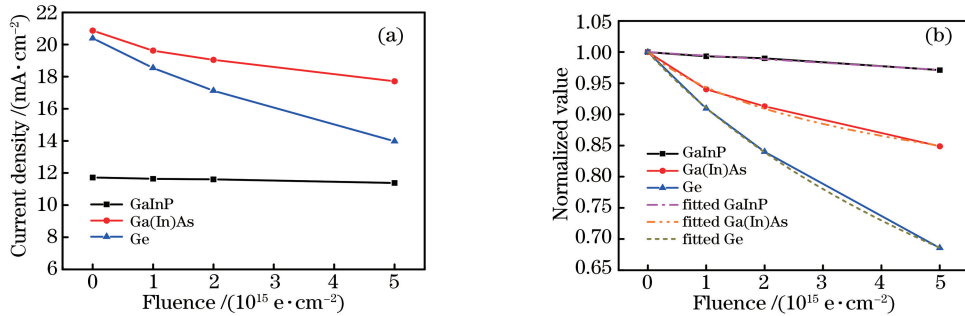


图 8 不同辐照注量下各子电池的短路电流密度。(a)退化曲线;(b)归一化曲线

Fig. 8 Short-circuit current density of sub-cells at different irradiation fluences. (a) Degradation curves; (b) normalized curves

此外,本文根据各子电池的短路电流密度 J_{sc} 归一化曲线拟合得到了短路电流密度的退化率,具体结果如表 4 所示。

表 4 不同辐照注量下各子电池短路电流密度 J_{sc} 的退化情况

Table 4 Degradation of short-circuit current density J_{sc} of each sub-cell at different irradiation fluences

Sub-cell	c_p	$\varphi_{0p}/(e \cdot \text{cm}^{-2})$
GaInP	4.885×10^{10}	3.71×10^{27}
Ga(In)As	0.2032	1.11×10^{15}
Ge	0.7988	3.39×10^{15}

从表 4 中可以发现,Ge 底电池短路电流密度 J_{sc} 的退化率和辐照临界注量最大,可以判定其退化幅度最大。另外,GaInP 顶电池的临界注量已经远大于电子辐照注量,因此其短路电流密度的归一化值与辐照注量的对数可以近似看成是线性退化关系;顶电池在退化率的数值以及临界注量的数量级方面均比整体 UMM3J 电池高,这不仅说明单个子电池辐照后产生的缺陷会直接影响整体电池的电学

表 3 不同电子辐照注量下 UMM3J 电池对应的 D_d 值
Table 3 D_d of UMM3J solar cell at different electron irradiation fluences

Electron fluence $/(e \cdot \text{cm}^{-2})$	$D_d/(MeV \cdot g^{-1})$
1×10^{15}	3.17×10^{10}
2×10^{15}	6.34×10^{10}
5×10^{15}	15.86×10^{10}

流密度 J_{sc} 的退化曲线及归一化曲线,可以看出,辐照前各子电池的短路电流密度 J_{sc} 分别为 11.72, 20.86, 20.38 mA/cm^2 ,并且不同辐照下 GaInP 子电池的短路电流密度 J_{sc} 最小。按照电流匹配原理得出辐照前后 UMM3J 电池的电流限制始终是 GaInP 顶电池,不再是抗辐照能力较弱的中电池,因此从一定程度上提高了电池的抗辐照性能。

性能,退化幅度也比整体电池大,而且也验证了多结电池的电流串联特性。

4.4 表面反射率曲线的退化规律

可以通过对比不同辐照注量下 UMM3J 电池 DBR 区域的反射率变化趋势,来探讨属于光学膜系设计范畴的 DBR 结构的抗辐照能力。

图 9(a)所示为 UMM3J 电池在不同辐照注量下的表面反射率。观察 200~1800 nm 波长范围内的反射率可以发现,随着辐照注量增加,反射率波形基本未发生变化,仅是电池在各波长下的反射率数值发生了衰减。这主要是因为辐照本身对光学膜系材料的影响不大,但却会对多结电池中子电池的有源区材料产生损伤,导致其不能有效地吸收入射光,因此在一定程度上影响了反射率。通过对波长范围进行进一步划分,如图 9(b)所示,可以发现:在 850~950 nm 波长范围内,随着辐照注量增大,DBR 结构的中心波长始终在 910 nm 附近,虽然高反射带宽区域的最高反射率发生了轻微退化,但在 $5 \times 10^{15} \text{ e}/\text{cm}^2$ 高注量条件下 DBR 结构区域的反射率

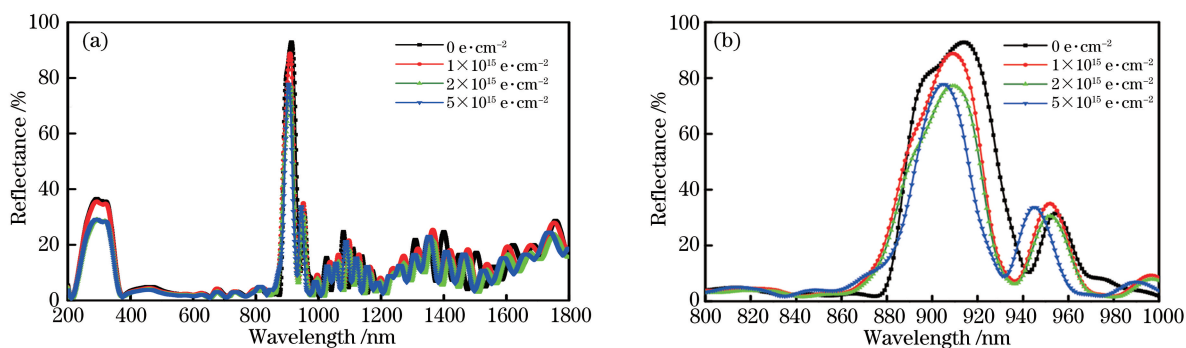


图9 不同辐照剂量下 UMM3J 太阳电池的反射率。(a) 全图; (b) 局部放大

Fig. 9 Reflectance of UMM3J solar cell at different irradiation fluences. (a) Whole curves; (b) partial enlargement

仍能达到 75% 左右, 这说明 DBR 结构在抗辐照方面能够起到积极作用。

5 结 论

利用 Macleod 软件在理论上设计出了由 16 对 GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 材料组成的 DBR 结构, 同时对嵌入该 DBR 结构的 UMM3J 电池进行 1 MeV 的高能电子辐照实验。仿真得出 DBR 结构在 910 nm 处的反射率为 95.83%, 实验得出 DBR 结构在高反射带宽内的最高反射率为 92.9%, 仿真值与实验值相差不大。

I-V 曲线的退化规律表明, UMM3J 电池的短路电流 I_{sc} 比开路电压 V_{oc} 的退化幅度大, 成为影响电池性能的关键参数。光谱响应曲线退化规律表明, 子电池 Ge 的短路电流 I_{sc} 的退化幅度比其他子电池大, GaInP 顶电池的电流始终等于 UMM3J 电池的整体电流。表面反射率退化规律表明, 随着电子辐照剂量增大, DBR 结构区域的中心波长位置未发生明显变化, 最高反射率虽然出现了退化, 但仍能起到高反射作用; 辐照在有源区内产生的缺陷会影响太阳电池的光电转换能力。因此, 针对此类空间电池进行进一步抗辐照加固设计并改进制备工艺, 对空间电池的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Fu R, Chen N F, Tu J L, et al. Latest technological development of highly efficient III-V multi-junction solar cells[J]. *Materials Review*, 2015, 29(7): 124-128, 149.
- [2] Karam N H, Fetzer C M, Liu X Q, et al. Metamorphic growth and multijunction III-V solar cells [M] // *Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) Growth, Materials Properties, and Applications*. [S. l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2019: 149-173.
- [3] Strobl G F X, Ebel L, Fuhrmann D, et al. Development of lightweight space solar cells with 30% efficiency at end-of-life [C] // 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 8-13 June 2014, Denver, CO, USA. New York: IEEE Press, 2014: 3595-3600.
- [4] Yamaguchi M, Sasaki T, Lee H S, et al. Radiation-resistance analysis of GaAs and InGaP sub cells for InGaP/GaAs/Ge 3-junction space solar cells [C] // 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 11-16 May 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [5] Liu X Q, Fetzer C, Chiu P, et al. Large area multijunction III-V space solar cells over 31% efficiency [C] // 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 25-30 June 2017, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2017: 2094-2098.
- [6] Li Z H, Aierken Abuduwayiti, Heini M, et al. Radiation effects of lattice matched and upright metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cells by 1 MeV electrons [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(4): 463-469.
- [7] Heini M, Aierken A, Li Z X, et al. Changes in output parameters of 1 MeV electron irradiated upright metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple junction solar cell [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(10): 105022.
- [8] Qiao C, Su R G, Li X, et al. Design and fabrication of 980 nm distributed Bragg reflection semiconductor laser with high power [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701002.
- [9] 李占行, 艾尔肯·阿不都瓦衣提, 玛丽娅·黑尼, 等. 1 MeV 电子辐照下晶格匹配与晶格失配 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳电池辐射效应研究 [J]. *发光学报*, 2017, 38(4): 463-469.

- 乔闯, 苏瑞巩, 李翔, 等. 980 nm 高功率 DBR 半导体激光器的设计及工艺 [J]. 中国激光, 2019, 46 (7): 0701002.
- [9] Fan J, Gong C Y, Yang J J, et al. Research progress of distributed Bragg reflector semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56 (6): 060003.
- 范杰, 龚春阳, 杨晶晶, 等. 分布布拉格反射器半导体激光器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060003.
- [10] Lantratov V M, Emelyanov V M, Kalyuzhnyy N A, et al. Improvement of radiation resistance of multijunction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells with application of Bragg reflectors [J]. *Advances in Science and Technology*, 2010, 74: 225-230.
- [11] Chang X Y, Yao S, Zhang Q L, et al. Anti-radiation of space triple-junction solar cell based on distributed Bragg reflector structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(10): 108801.
- 常晓阳, 尧舜, 张奇灵, 等. 基于分布式布拉格反射器结构的太空三结砷化镓太阳能电池抗辐照研究 [J]. 物理学报, 2016, 65(10): 108801.
- [12] Ma D Y, Chen N F, Tao Q L, et al. Performance of space GaInP/(In)GaAs/Ge triple-junction solar cell containing Bragg reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1131001.
- 马大燕, 陈诺夫, 陶泉丽, 等. 包含布拉格反射器的太空用 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳能电池性能 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1131001.
- [13] Jiang Y J, Keevers M J, Pearce P, et al. Design of an intermediate Bragg reflector within triple-junction solar cells for spectrum splitting applications [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 193: 259-269.
- [14] Kovacs A, Jonnalagadda P, Mescheder U. Optoelectrical detection system using porous silicon-based optical multilayers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(10): 2413-2420.
- [15] Bahrami A, Mohammadnejad S, Abkenar N J. Modified-DBR-based semi-omnidirectional multilayer anti-reflection coating for tandem solar cells [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(2): 028803.
- [16] Ding D, Johnson S, Yu S Q, et al. A semi-analytical model for semiconductor solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(12): 123104.
- [17] Lim L H I, Ye Z, Ye J Y, et al. A linear method to extract diode model parameters of solar panels from a single I-V curve [J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 135-142.
- [18] Imaizumi M, Nakamura T, Tajima M, et al. Comparative study on degradation characteristics of component subcells in IMM triple-junction solar cells irradiated with high-energy electrons and protons [C]// 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 16-21 June 2013, Tampa, FL, USA. New York: IEEE Press, 2013: 3243-3248.
- [19] Inguibert C, Messenger S. Equivalent displacement damage dose for on-orbit space applications [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(6): 3117-3125.
- [20] Zhao X F, Aierken A, Heini M, et al. Degradation characteristics of electron and proton irradiated InGaAsP/InGaAs dual junction solar cell [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 206: 110339.