

基于分布式布拉格反射器结构的空三结砷化镓太阳能电池抗辐照研究

常晓阳 尧舜 张奇灵 张杨 吴波 占荣 杨翠柏 王智勇

Anti-radiation of space triple-junction solar cell based on distributed Bragg reflector structure

Chang Xiao-Yang Yao Shun Zhang Qi-Ling Zhang Yang Wu Bo Zhan Rong Yang Cui-Bai Wang Zhi-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 108801 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.108801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

直接键合的三结太阳能电池研究

Research on three-junction bonding solar cell

物理学报.2014, 63(17): 178801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178801>

空间用 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As(1 eV) 倒装三结太阳电池研制

Investigation of inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As (1 eV) triple junction solar cells for space applications

物理学报.2013, 62(15): 158802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.158802>

碳纳米管掺杂对聚合物聚(2-甲氧基-5-辛氧基)对苯乙炔-PbSe 量子点复合材料性能的影响

Effect of carbon nanotubes on the properties of polymer MOPPV-PbSe quantum dot composites

物理学报.2013, 62(12): 128801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.128801>

聚对苯乙炔 MOPPV/ZnSe 量子点复合材料太阳能电池性能研究

Investigation on characteristics of solar cells made of MOPPV/ZnSe quantum dots composite system

物理学报.2013, 62(7): 078802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.078802>

基于 GaAs/InAs-GaAs/ZnSe 量子点太阳能电池结构的优化

Optimization of quantum dot solar cells based on structures of GaAs/InAs-GaAs/ZnSe

物理学报.2012, 61(13): 138801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.138801>

基于分布式布拉格反射器结构的空三结砷化镓太阳能电池抗辐照研究*

常晓阳¹⁾ 尧舜^{1)†} 张奇灵¹⁾ 张杨¹⁾ 吴波²⁾ 占荣²⁾
杨翠柏²⁾ 王智勇¹⁾

1) (北京工业大学, 激光工程研究院, 北京 100124)

2) (瑞德兴阳新能源技术有限公司, 中山 528437)

(2015年12月7日收到; 2016年2月4日收到修改稿)

根据电子辐照条件下的常规三结砷化镓太阳能电池光谱响应以及电池电流的损伤特征, 确定电池衰减的物理机理: 中电池在电子辐照后形成的辐照损伤缺陷, 使得基区少子扩散长度被大幅缩短, 影响了光生载流子的收集. 针对中电池衰减的物理机理, 设计不同的基区厚度, 验证辐照后扩散长度缩短至 1.5 μm 左右. 为提升中电池抗辐照性能, 消除辐照后扩散长度缩减带来的影响, 对中电池外延结构进行设计, 将中电池基区减薄至 1.5 μm , 并在其下方嵌入分布式布拉格反射器, 对特定波段光反射进行二次吸收, 弥补中电池减薄的影响. 通过 TFCalc 光学模系设计软件模拟出的中心波长为 850 nm, 15 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 的分布式布拉格反射器, 实际测试最高反射率大于 97%, 高反带宽 94 nm, 能够满足设计要求. 在此基础上进行了新结构电池的外延生长与辐照测试对比. 实验结果表明: 新结构太阳能电池辐照后短路电流衰减比原结构降低了 50%, 效率的剩余因子提升 2.3%.

关键词: 分布式布拉格反射器, 三结太阳能电池, 辐照损伤, 扩散长度

PACS: 88.40.jp, 81.40.Wx, 78.66.-w

DOI: 10.7498/aps.65.108801

1 引言

空间 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池具备光电转换效率高、抗辐射能力强、在轨运行环境稳定性好等特点, 被广泛应用于航天领域, 目前已逐渐成为空间电池的主流. 航天器在轨服役期间要受到空间高能粒子的辐射, 高能粒子射入太阳电池中, 使太阳能电池材料受到损伤, 电池电学性能发生衰减, 影响航天器的供电系统, 进而影响航天器的寿命与可靠性, 所以对三结砷化镓太阳电池的辐射衰减的研究具有重要意义.

空间 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池是由 GaInP 顶 (top) 电池, GaInAs 中 (middle) 电池和 Ge 底 (bottom) 电池三个子电池通过两个隧道结

串联而成, 因此三结电池的短路电流会受最小的子电池电流限流, 即

$$I_{\text{SC}} = \min[I_{\text{top}}, I_{\text{mid}}, I_{\text{bot}}]. \quad (1)$$

由此可见, 如果想获得最大的短路电流, 需三个子电池电流密度基本相同, 但由于电池材料受晶格匹配的严格限制, 目前 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ 三结太阳电池中, 三结子电池各自吸收不同波段的太阳光谱, 顶电池 GaInP 材料具有最大带隙, 约 1.90 eV, 吸收小于 655 nm 以下波段的光; 中电池 GaInAs 材料带隙为 1.42 eV, 吸收 655—880 nm 波段的光; 底电池 Ge 带隙为 0.67 eV, 吸收 880—1850 nm 波段的红外光, 底电池电流密度要远大于中、顶电池, 因此在电流分析中只需考虑中、顶电池的电流匹配问题.

* 中山市科技强企支撑计划 (批准号: 2013A3FC0192) 和中山市战略性新兴产业项目基金 (批准号: ZSEI-2013468008) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yaoshun@bjut.edu.cn

由于空间搭载试验的成本较高和难度较大, 而在地面又难以模拟出真实的太空环境, 因此需建立起太阳能电池的辐照损伤效应的地面等效模型. 目前采用的主要有等效注量法^[1,2]和等效位移损伤法^[3,4]. 吴宜勇等^[5]采用等效位移损伤方法, 给出了三结电池在轨带电粒子辐照条件下的损伤特征, 如图1所示, 指出三结太阳能电池中GaAs子电池的辐照损伤敏感度最大, 是三结电池性能衰减的主要因素.

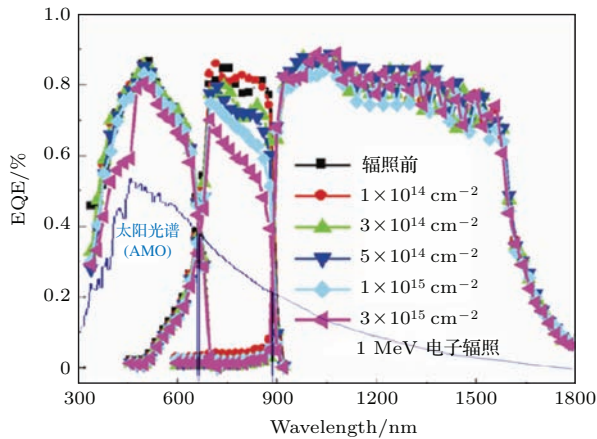


图1 (网刊彩色) GaInP₂/GaAs/Ge 三结太阳能电池在 1 MeV 电子辐照后的性能变化和各子电池所吸收的太阳光谱

Fig. 1. (color online) Property change of GaInP₂/GaAs/Ge cell after 1 MeV electron irradiation and absorb solar spectrum by subcells.

基于两种方法, 胡建民等^[6,7]分别给出单结GaAs/Ge电池在电子、质子辐照下性能衰减规律和对电池的暗特性参数的影响, 揭示了太阳能电池的内部载流子的运输状态和机理. 齐佳红等^[8]以电子辐照单结GaAs/Ge太阳能电池试验数据为基础, 通过PC1D软件拟合太阳能电池的光谱响应和I-V特性曲线, 给出多数载流子浓度和少数载流子扩散长度与辐照电子能量和注量的关系, 进一步揭示太阳能电池辐照损伤的内在物理机理. 目前关于电子辐照下的空间电池研究, 多为电性能衰减行为的实验和理论分析, 对太阳能电池外延结构进行抗辐照设计的方面报道较少. 其中Emelyanov等^[9]给出了GaAs电池扩散长度在3 MeV电子辐照, 注量为 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 条件下的变化, 以及添加不同参数的分布式布拉格反射器(DBR)后电池光谱响应, 验证了添加DBR结构的抗辐照的理论可行性; 高伟等^[10]制作出了AM0条件下29.3%效率的含有DBR结构的三结砷化镓电池, 但是缺少辐

射的实验验证. 对此本文根据已有的太阳能电池辐照损伤效应的理论分析与实验, 在1 MeV, 累积注量 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 条件下, 测试了中电池子电池辐照损伤的光谱响应, 给出了中电池扩散长度缩短后的长度, 通过软件模拟优化DBR结构并成功导入三结砷化镓电池外延结构中, 在此基础上进行新结构三结砷化镓空间电池的外延生长与辐照对比测试.

2 实验

实验样品选用GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池, 采用金属有机化合物气相沉积法(MOCVD)制备, 面积为 $4 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, 其结构参数如图2所示.

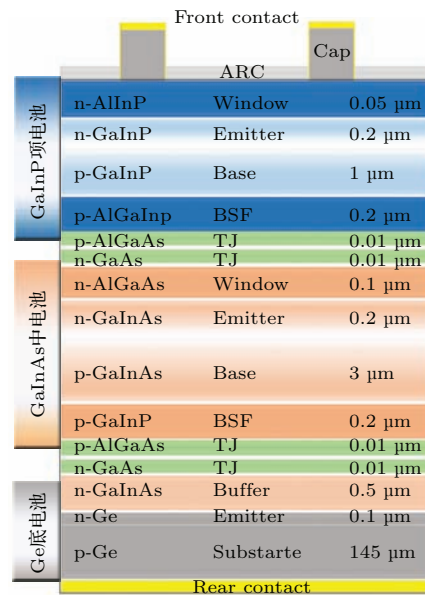


图2 (网刊彩色) 空间GaInP/GaAs/Ge三结太阳能电池结构示意图

Fig. 2. (color online) Structure chart of GaInP/GaAs/Ge solar cells.

为了研究电子辐照对太阳能电池电流衰减的影响, 实验选择1 MeV电子, 使用ELV-8II电子加速器对GaInP/GaInAs/Ge太阳能电池进行辐照试验. 根据地面等效模拟加速试验的等效模拟区间^[11], 选取电子通量为 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 累积注量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. 参照太阳能电池国际测试标准^[12], 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和AM0(辐照功率为 $136.7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)条件下, 使用Spectrolab X25 Mark II型太阳模拟器, 对辐照前后电池样品性能参数进行测试. 使用PVE300太阳能电池量子效率测试仪, 测试300—960 nm的电子辐照前后太阳能电池的光谱响应.

3 结果与讨论

3.1 三结电池电流衰减特征与损伤机理

根据表1中辐照前后的电流密度变化,结合图1在不同辐照剂量下的光谱响应曲线可知,电子辐照对三结太阳能电池中的顶、底电池损伤较小,当电子辐照剂量达到 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,顶、底电池的外量子效率变化不大;而随着电子辐照注量的增加,中电池的外量子效率在不断减小,电流密度衰减较快,衰减量是顶电池的2.4倍,因此中电池在辐照中受损最为严重,成为限制三结电池电流值的关键环节.为提高辐照后三结电池电流大小,必须提升中电池的抗辐照性能.

表1 辐照前后中、顶子电池电流密度变化
Table 1. Photocurrent density change of middle and top subcells after electron irradiation.

	电流密度/ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$		
	顶电池	中电池	备注
辐照前	17.20	17.56	顶电池限流
辐照后	16.65	16.23	中电池限流
衰减差值	0.55	1.33	中顶衰减比: 2.4

当入射电子的能量高于晶格原子发生位移的能量阈值时,其中电子在GaAs材料中的原子位移阈能为245 keV,辐射损伤基本上可以看作为入射电子与晶格原子的弹性散射,高能粒子的部分能量传递给了晶格原子,导致晶格离开原始位置,形成辐照损伤缺陷[13].这些缺陷将起到复合中心的作用,使得少子寿命降低,扩散长度缩短,进而造成部分少子来不及扩散到空间电荷区就被空间电场分离而发生复合,最终导致太阳能电池性能下降.

由于辐照缺陷形成的复合中心浓度与粒子的辐照注量 Φ 成正比[14],即

$$N_T = K_0\Phi, \quad (2)$$

其中, K_0 为平均每个粒子在单位路径上产生的复合中心数,它取决于粒子的性质和能量.对于一定的辐照注量 Φ ,辐照前后少子扩散长度可以表示为

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L\Phi, \quad (3)$$

其中, L_0 和 L 分别为辐照前后的少子扩散长度, K_L 称为扩散长度损伤系数.

对于一定波长的入射光,太阳能电池的短路电流与少子扩散长度成正比[15],即 $I_{SC} \propto L$,由此可验证图1的中电池光谱响应变化趋势,随着辐射注量增加,位移损伤缺陷浓度增大,导致少子扩散长度缩短,从而影响少子的收集效率.

为进一步验证辐射对扩散长度的影响,针对中电池设计子电池实验,因为正常结构中电池基区厚度为 $3 \mu\text{m}$,因此图3为中电池厚度为 $3 \mu\text{m}$ 的子电池在受辐照前后的对比,图4为中电池基区厚度为 $3, 2, 1.5, 1.2 \mu\text{m}$ 的顶、中电池光谱响应曲线.

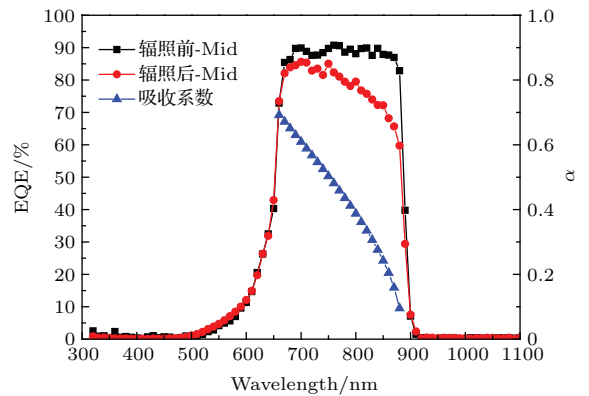


图3 (网刊彩色) GaInAs子电池辐照前后的光谱响应以及GaInAs材料的吸收系数

Fig. 3. (color online) Spectral of the photoresponse change of a GaInAs subcell after electron irradiation and curve of absorption coefficient of the GaInAs material.

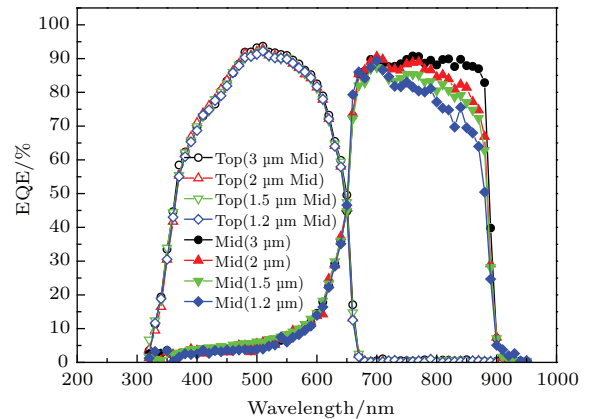


图4 (网刊彩色) 不同基区厚度的中电池的光谱响应

Fig. 4. (color online) Spectral of the photoresponse of GaInAs subcells with different thickness of base.

中电池材料为 $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$, 具有较高的吸收系数,厚度为 $3 \mu\text{m}$,可吸收95%以上的光谱能量.在电池结构中,基区厚度远远大于发射区,光生载流子的扩散长度与基区厚度相当,当太阳能电池受到辐射损伤时,扩散长度变短,基区底部的光生

载流子更难以到达结区而被收集. 因此, 在一定的电子辐照剂量下, 电池性能的衰减源于基区的辐照损伤.

如图 3 所示, 直接带隙 GaInAs 材料光的吸收系数 α 同光子能量相关, 即

$$\alpha(E) = A(E - E_g)^{1/2}, \quad (4)$$

其中, A 是有关材料的常数. 电子辐照后中电池的光谱响应在 655—880 nm 波段内整体降低, 长波方向尤为明显, 衰减趋势同图 4 中基区减薄后类似, 这是因为短波更容易被基区上部所吸收. 长波虽然能被基区的下部所吸收, 由于扩散长度的缩短, 少子并没被有效收集. 对比图 3、图 4 可以看出, 辐照后光谱响应曲线等效于中电池基区 1.2—1.5 μm 时的太阳能电池, 可以认为辐照后电池基区的扩散长度至多为 1.5 μm .

为提升中电池抗辐照能力, 避免辐照后扩散长度缩短带来的影响, 应该直接减薄电池基区的厚度, 但是基区厚度减薄会影响中电池对长波的吸收. 为解决这个问题, 借鉴电池的抗反射膜结构设计 [16], 在中电池基区下方添加一个反射 DBR 结构, 让中电池长波段的光被反射后进行二次吸收, 满足中电池对光生载流子的需求.

3.2 DBR 结构的优化设计

DBR 结构由两层不同折射率材料交替叠加组成, 且每一层材料的光学厚度都必须满足 $1/4$ 的中心波长. 假设两种材料分布为高折射率 n_H 和低折射率 n_L , 当 m 对高低折射率膜层交替, 膜系上层为高折射率层时, 如果材料无吸收损耗, DBR 前后接触层折射率分布为 n_0, n_S , 对于中心波长 λ_0 的反射率可以表示为

$$r = \frac{1 - [n_S/n_0][n_L/n_H]^{2m}}{1 + [n_S/n_0][n_L/n_H]^{2m}}. \quad (5)$$

另外, 该 DBR 高反射区的带宽可以表示为

$$\Delta\lambda = 4/\pi \arcsin \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right). \quad (6)$$

由此可见, 反射率的大小同 DBR 的对数、材料折射率比值相关, 高反带宽只与两种材料的折射率相关, 折射率差值越大, 带宽越宽.

根据以上理论分析, 结合实际生长条件, 考虑晶格匹配, 可以嵌入到三结电池中的 DBR 主要有: AlAs/GaAs, AlInP/GaInP, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 三种. 其中 GaAs 材料带隙较小, 吸收中电池波段的光, 高质量的 AlInP 材料生长较为困

难, 因此最合适的结构为不同组分的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 材料. 结合材料的带隙与折射率大小, 根据 (5) 式, 选择 $x = 9, y = 1$, 计算出的高反带宽约为 100 nm, 再根据中电池的吸收波长, 确定中心波长为 850 nm.

最终确定 DBR 结构为 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 折射率为 3.12/3.54, 膜层厚度为 68 nm/60 nm. 使用 TFCalc 光学膜系设计软件, 对 DBR 层数与反射率曲线进行模拟, 结果如图 5 所示. 由图可见, 对数越多, 反射率越高, 15 对时中心波长反射率大于 97%, 20 对时接近 100%. 但实际生长情况是, 对数越多, 材料质量越无法保障, 并且反射率会降低. 如图 6 所示, 使用分光光度计测试 20 对的反射率与 15 对相差不大, 部分波段前者略低于后者, 并且 15 对时模拟结果同实际测试结果基本一致. 经综合考虑, 实验选择 15 对, 通过优化生长温度, 厚度均匀性等生长工艺, 反射率最高达 97%, 符合预期, PL 测试中心波长为 852 nm, 反射带宽为 94 nm, 完全满足设计要求.

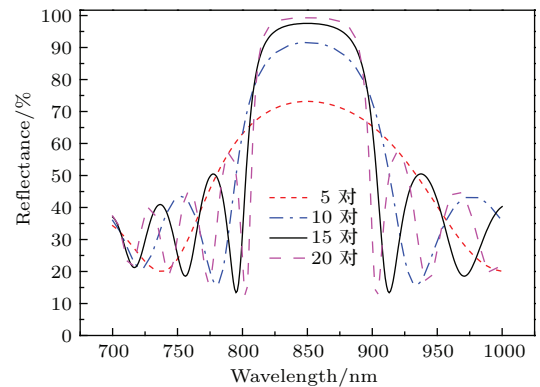


图 5 (网刊彩色) 不同对数的 DBR 反射谱

Fig. 5. (color online) Reflectivity spectra with different pairs of DBR.

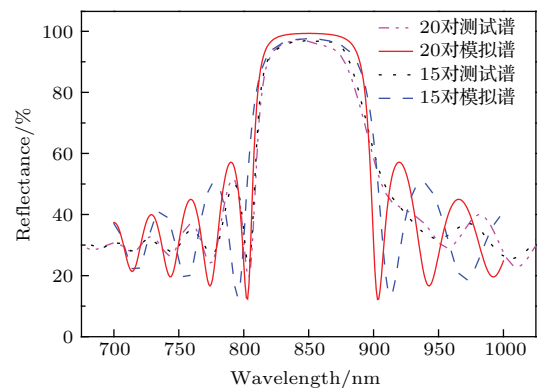


图 6 (网刊彩色) 15 和 20 对 DBR 外延结构的理论反射谱与测试反射率

Fig. 6. (color online) Reflectivity spectra of theory and practice about 15 and 20 pairs of DBR.

3.3 含有DBR结构电池的抗辐照验证

通过优化DBR材料的生长工艺, 精确地控制材料组分, 将DBR结构导入到电池外延结构中, 其中DBR结构位于buffer层之上、隧道结之下, 整体结构N掺, 电池结构如图7(c)所示; 为验证DBR结构的作用, 另外增加一个中电池基区1.5 μm的对照实验, 如图7(b)所示. 实验结果如图8所示,

3个电池的顶电池的光谱响应基本一致, 说明DBR结构的导入或中电池基区减薄对顶电池影响较小; 结构(c)与结构(a)的中电池光谱响应基本相同, 800—900 nm波长要远远高于基区减薄后的结构(b), 略高于原电池结构(a). 由此可见, 15对的DBR结构起到了很好的反射作用, 使反射光可以进行二次吸收, 完全达到了设计的目的.

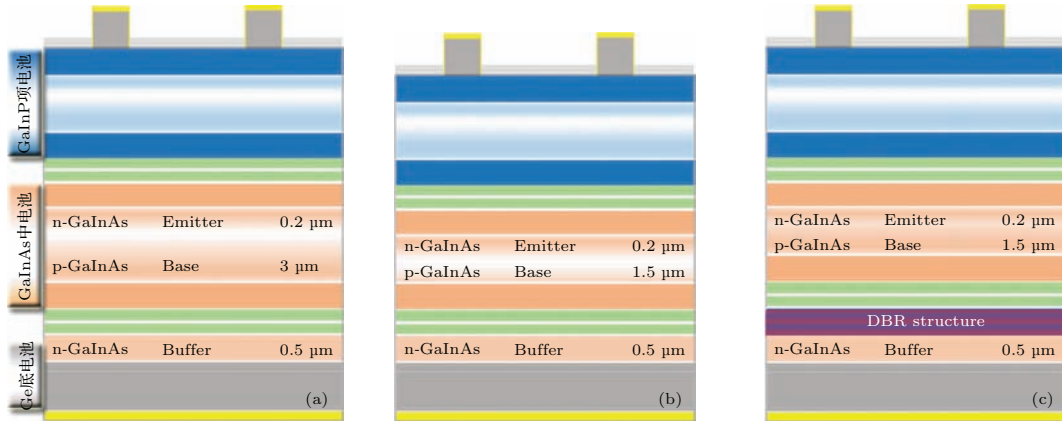


图7 (网刊彩色) 不同的电池结构 (a) 原电池结构; (b) 中电池基区减薄的电池结构; (c) 新电池结构

Fig. 7. (color online) Solar cells with different structure: (a) The original cell; (b) cell with base 1.5 μm; (c) the new cell with DBR structure.

表2 两种结构电池性能数据对比

Table 2. Performance about the different structure of solar cells.

结构 参数	原结构电池 (a)				新结构电池 (c)			
	V_{oc}/mV	I_{sc}/mA	FF/%	$E_{ff}/%$	V_{oc}/mV	I_{sc}/mA	FF/%	$E_{ff}/%$
辐照前	2697.5	415.3	0.87	29.94	2714.7	407.5	0.861	29.32
辐照后	2453.7	389.5	0.85	24.92	2467.7	394.9	0.835	25.06
剩余因子	91.0%	93.8%	97.7%	83.2%	90.9%	96.9%	97.0%	85.5%

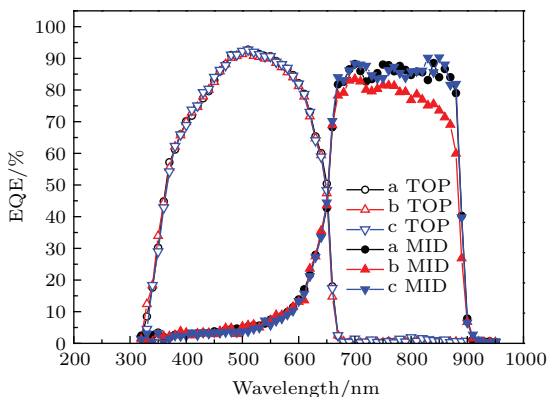


图8 (网刊彩色) 不同结构的中电池的光谱响应

Fig. 8. (color online) Spectral of the photoresponse of GaInAs subcells with different structure.

表2中剩余因子是指辐照前后电池性能参数的比值, 是衡量电池抗辐照性能的一个重要指标.

对比两种电池结构辐照前后数据, 两种电池在 V_{oc} , FF参数的抗辐照性能上相差很小, 但新结构的太阳能电池辐照后短路电流剩余因子由原结构的93.8%提升到96.9%, 电流衰减降低了50%. 最终, 因为电流抗辐照性能的提升, 效率的剩余因子也由原结构的83.2%提升了2.3%. 由此可见, 新结构的电流抗辐照能力要优于原结构, 该设计明显改善了辐照后电池电流的衰减, 极大地提升了中电池的抗辐照性能.

此外, 虽然新结构电池提升了电流的抗辐照性能, 辐照后电池剩余效率优于原电池结构, 但从表2中的辐照前性能数据来看, 新结构电池的电性参数并非十分理想. 其中短路电流受中电池基区减薄带来的影响并没有被DBR结构完全弥补,

为此还需要对中电池基区厚度、DBR结构的反射率、高反带宽、中心波长等进行优化. 另外, 导入的DBR结构约 $2\ \mu\text{m}$, 进而使电池电阻、材料质量等发生变化, 因此还需要对电池结构的掺杂、生长条件等工艺进行后续优化.

4 结 论

本文根据辐照后的 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳能电池电流的损伤特征, 以及电池辐照条件下的光谱响应, 确定了三结电池电流衰减的主要原因, 分析了电池衰减的物理机理; 并运用 TFCalc 光学模系设计的软件模拟, 对中电池进行了合理的设计, 通过试验验证了新设计的太阳能电池在电流抗辐照方面的优异性能.

首先对中电池衰减现象进行理论分析与实验验证. 中电池在电子辐照后形成的辐照损伤缺陷, 使得基区的少子寿命降低, 扩散长度被大幅缩短至约 $1.5\ \mu\text{m}$, 影响了光生载流子的收集. 为消除扩散长度缩短对中电池的影响, 将中电池基区减薄, 设计了一个 15 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 的 DBR 结构, 使中电池的部分波段发生反射进行二次吸收, 弥补基区减薄带来的影响. 最终新结构的太阳能电池解决了辐照后中电池扩散长度缩短带来的问题, 提升了辐照后的中电池电流, 达到了抗辐照的目的.

感谢瑞德兴阳新能源技术有限公司的刘建庆博士、毛明明博士、彭娜工程师以及北京工业大学邱运涛老师等提供的帮助.

参考文献

- [1] Messenger S R, Jackson E M, Warner J H, Walters R J 2010 *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Honolulu, Hi, USA, June 20–25, 2010 p1106
- [2] Summers G P, Messenger S A, Walters R J, Burke E A 2001 *Progr. Photovoltaics Res. Applicat.* **9** 103

- [3] Takamoto T, Agui T, Kamimura K, Kaneiwa M 2003 *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Osaka, Japan, May 11-18, 2003 p581
- [4] Wu Y Y, Yue L, Hu J M, Lan M J, Xiao J D, Yang D Z, He S Y, Zhang Z W, Wang X C, Qian Y, Chen M B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098110 (in Chinese) [吴宜勇, 岳龙, 胡建民, 蓝慕杰, 肖景东, 杨德庄, 何世禹, 张忠卫, 王训春, 钱勇, 陈鸣波 2011 物理学报 **60** 098110]
- [5] Wu Y Y, Yue L, Hu J M, Xiao J D, Chen M B, Qian Y, Yang D Z, He S Y 2011 *Spacecraft Environment Engineering* **28** 329 (in Chinese) [吴宜勇, 岳龙, 胡建民, 肖景东, 陈鸣波, 钱勇, 杨德庄, 何世禹 2011 航天器环境工程 **28** 329]
- [6] Yue L, Wu Y Y, Zhang Y Q, Hu J M, Sun C Y, Hao M M, Lan M J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 188101 (in Chinese) [岳龙, 吴宜勇, 张延清, 胡建民, 孙承月, 郝明明, 蓝慕杰 2014 物理学报 **63** 188101]
- [7] Hu J M, Wu Y Y, He S, Qian Y, Chen M B, Yang D Z 2010 *Acta Energetica Sol. Sin.* **31** 1568 (in Chinese) [胡建民, 吴宜勇, 何松, 钱勇, 陈鸣波, 杨德庄 2010 太阳能学报 **31** 1568]
- [8] 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]
- [9] Lantratov V, Emelyanov V, Kalyuzhnyy N, Mintairov S, Shvarts M 2010 *Adv. Sci. Technol.* **74** 225
- [10] Gao W, Gao H, Xu J, Zhang B, Liu C X, Wang B M, Mu J 2014 *Chinese Journal of Power Sources* **5** 841 (in Chinese) [高伟, 高慧, 许军, 张宝, 刘长喜, 王保民, 穆杰 2014 电源技术 **5** 841]
- [11] Hu J M, Wu Y Y, Yang D Z, He S Y 2008 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **266** 3577
- [12] ASTM Standard, E2236-05a <http://www.astm.org> [2015-11-16]
- [13] Hu J M 2009 *Ph. D. Dissertation* (Haerbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [胡建民 2009 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [14] Sato S I, Ohshima T, Imaizumi M 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 044504
- [15] An Q L, Cao Q S, Li G X, Liu B Y, Zhang Z K 1984 *The Principle and Technology of Solar Cell* (Shanghai: Science and Technology of China Press) pp91–94 (in Chinese) [安其霖, 曹国琛, 李国欣, 刘宝元, 张忠奎 1984 太阳能电池原理与工艺 (上海: 科学技术出版社) 第 91—94 页]
- [16] Bahrami A, Mohammadnejad S, Abkena N J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 28803

Anti-radiation of space triple-junction solar cell based on distributed Bragg reflector structure*

Chang Xiao-Yang¹⁾ Yao Shun^{1)†} Zhang Qi-Ling¹⁾ Zhang Yang¹⁾ Wu Bo²⁾
Zhan Rong²⁾ Yang Cui-Bai²⁾ Wang Zhi-Yong¹⁾

1) (Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

2) (Redsolar New Energy Technology Co. Ltd., Zhongshan 528437, China)

(Received 7 December 2015; revised manuscript received 4 February 2016)

Abstract

At present, solar cells are the main sources for spacecrafts. For a long time the bulk of the space power installations has been the solar arrays based on single junction silicon and gallium arsenide solar cells. In recent years a trend has been the active use of triple-junction GaAs solar cell with higher efficiency instead of single junction solar cells. One of the most important characteristics of solar cells used in spacecrafts is the resistance to radiation damages caused by high energy particles of the near-Earth space. According to the spectral response of triple-junction GaAs solar cell and the damage characteristics of the current under the condition of electron irradiation, the physical mechanism of cell attenuation can be determined: the current degradation originates mainly from the GaInAs subcells. These damages form additional centers of nonradiative recombination, which results in the reduction of the minority charge carrier diffusion lengths and in degradation of the solar cells photocurrent.

The radiation damage caused by the electron irradiation will shorten the diffusion length of the base region and affect the collection of photo generated carriers. The ways of improving absorption of long wavelength light in GaInAs subcells with a thin base in using the distributed Bragg reflector can be investigated by the mathematical simulation method based on calculating the light propagation in a multilayer structure by means of the TFCalc software which can design optical structure. To estimate the validity of these methods for solar cells structures with distributed Bragg reflector, the spectral dependences of the photoresponse and the reflection coefficient with different base thickness values are calculated and compared with experimental results. Based on the physical mechanism of the degradation, the thickness of middle subcell base layer is reduced, and an appropriate structure of the distributed Bragg reflector is simulated by the TFCalc software.

As a result, the new structure solar cells are that the thickness of the base layer is 1.5 μm compared with the different middle subcell thickness values, and the distributed Bragg reflector structure with 15 pairs of the $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ with 850 nm central wavelength is embedded in the middle subcell of the base layer, the distributed Bragg reflector has a highest reflectivity of more than 97% in the actual test, and a bandwidth of 94 nm, which can satisfy design requirement. After irradiating the new structure of solar cells, the decay of its short-circuited current is reduced by 50% compared with that of the original structure, and the remaining efficiency factor is increased by 2.3%.

Keywords: distributed Bragg reflector, triple-junction solar cell, irradiation damage, diffusion length

PACS: 88.40.jp, 81.40.Wx, 78.66.-w

DOI: 10.7498/aps.65.108801

* Project supported by the Zhongshan City "Supporting Science and Technology" for Company, China (Grant No. 2013A3FC0192) and the Strategic Emerging Industries Foundation of Zhongshan City, China (Grant No. ZSEI-2013468008).

† Corresponding author. E-mail: yaoshun@bjut.edu.cn