

包含布拉格反射器的空间 用 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳能电池性能

马大燕¹, 陈诺夫^{1*}, 陶泉丽¹, 赵宏宇², 刘虎^{1,3}, 白一鸣¹, 陈吉莖⁴

¹华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206;

²北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100070;

³石家庄铁道大学数理系, 河北 石家庄 050043;

⁴北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

摘要 利用光学膜系设计软件(TFCalc),设计出空间用 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳能电池的分布式布拉格反射器(DBR)。实验结果表明由 15 对 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 组成的 DBR 在中心波长 850 nm 处的反射率高达 96%,使 800~900 nm 波段内红外光被有效反射后又被二次吸收,提高了 GaInAs 中间电池的抗辐照能力。基于细致平衡原理,结合 p-n 结形成机理,对原电池结构和包含 DBR 的新电池结构进行厚度优化。通过对比中电池厚度为 2.93 μm 的原电池结构和厚度为 1.2, 1.6, 2.0 μm 的新电池结构的辐照前外量子效率(EQE),发现新电池结构基本弥补了基区减薄对短路电流的影响。通过分析两种结构电池辐照前后的电学性能,发现 DBR 结构的存在明显改善了辐照后电池电流的衰减,并且中电池厚度为 1.6 μm 的新电池结构辐照后效率高达 24.87%,较原电池结构提升了近 2%,基本接近中电池厚度为 2.0 μm 的新电池结构,且明显高于 1.2 μm 中电池厚度的新电池结构。

关键词 薄膜; 分布式布拉格反射器; 三结太阳能电池; 二次吸收; 抗辐照; 厚度优化

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1131001

Performance of Space GaInP/(In)GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell Containing Bragg Reflector

Ma Dayan¹, Chen Nuofu¹, Tao Quanli¹,
Zhao Hongyu², Liu Hu^{1,3}, Bai Yiming¹, Chen Jikun⁴

¹ School of Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² Beijing Guowang Fuda Science and Technology Development Co. Ltd., Beijing 100070, China;

³ Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, HeBei 050043, China;

⁴ School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Abstract A distributed Bragg reflector (DBR) for space GaInP/(In)GaAs/Ge triple-junction solar cell is designed by the optical film design software (TFCalc). The experimental results show that the reflectivity of 15-pair $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ DBR is 96% at the center wavelength of 850 nm. The light in the spectral range of 800-900 nm is reflected and then absorbed twice, which enhances the anti-radiation ability of the middle subcell. According to the detailed balance principle and p-n junction formation mechanism, the thicknesses of the original cell structure and the new cell structure containing the DBR are optimized. By comparing the external quantum efficiency (EQE) of the original cell structure with middle subcell thickness of 2.93 μm and the new cell structure with middle

收稿日期: 2017-04-28; **收到修改稿日期:** 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(61006050, 61076051)、中央高校基本科研业务费专项(13ZD05)、北京市自然科学基金(2151004)

作者简介: 马大燕(1984—),女,博士研究生,主要从事高效太阳能电池应用方面的研究。E-mail: madayan@yeah.net

导师简介: 陈诺夫(1959—),男,博士,教授,主要从事太阳能电池与光伏发电系统等方面的研究。

E-mail: nfchen@ncepu.edu.cn(通信联系人)

subcell thickness of 1.2, 1.6 and 2.0 μm , we conclude that the influence of the battery current attenuation by thinning base can be almost made up by the new structure. By analyzing the electrical properties of the two types of solar cell structures before and after irradiation, we find that the DBR structure significantly improves the decay of the current after irradiation. The efficiency of the new structure with the middle subcell thickness of 1.6 μm is up to 24.87%, which is increased by nearly 2% than that of the original structure, close to that of the new structure with the middle subcell thickness of 2.0 μm , and significantly higher than that of the new cell structure with middle subcell thickness of 1.2 μm .

Key words thin films; distributed Bragg reflector; triple-junction solar cell; secondary absorption; anti-radiation; thickness optimization

OCIS codes 310.4165; 310.6805; 350.6050

1 引 言

目前, GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳电池因光电转换效率高、抗辐照能力强、在轨运行稳定性好等优势, 已全面取代硅(Si)电池成为空间电池的主流。作为航天器的主电源, 太阳电池工作过程中会受到空间高能粒子的辐射, 使电池体内产生大量的晶格损伤。这些损伤会成为载流子的复合中心, 使部分光生载流子在到达空间电荷区前被俘获, 尤其是基区深处的少子会更容易被俘获, 缩短了少子寿命, 严重降低了太阳电池的光电性能^[1], 进而影响航天器的可靠性与使用寿命。

通常可以通过减薄电池的基区厚度和生长布拉格反射器等方式来提高太阳电池的抗辐照能力。基于半导体材料的布拉格反射器已经在激光器和其他半导体光学器件中得到了广泛应用^[2-3], 已有研究利用传统及异型布拉格反射结构设计实现了宽频谱内的高反射^[4-5], 但是针对空间三结砷化镓(GaAs)太阳电池分布式布拉格反射(DBR)结构方面的报道较少。吴宜勇等^[6]采用等效位移损伤剂量法, 指出 GaAs 中电池的辐照损伤敏感度最大, 是三结电池中性能衰减的主要因素。常晓阳等^[7]在电子通量为 $10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、累积注量为 10^{15} cm^{-2} 的电子辐照下, 得出添加 DBR 结构后 GaAs 中电池基区减薄为 1.5 μm 的新电池结构较厚度为 3 μm 的原电池结构的抗辐照能力得到了明显的提升, 但是缺少电池厚度与 DBR 优化设计的理论解释。对此, 本文基于电子辐照下空间太阳电池的损伤机理, 借助光学膜系设计软件(TFCalc)优化设计合理的 DBR 结构, 将其成功导入三结砷化镓电池外延结构中, 同时基于细致平衡原理, 重新分配三结太阳电池对太阳光的吸收, 以期得到砷化镓三结太阳电池的最优厚度组合。

2 理论部分

2.1 布拉格理论

分布式布拉格反射是由多层高折射率和多层低折射率材料交替组成的周期结构。从多光束干涉原理考虑, 当膜层的诸反射光束中相继两光束的相位差为 π 时, 这两束光的反射最强。DBR 膜系恰恰能使它包含的每一层膜都满足上述条件, 即各界面的反射光发生干涉相长。每层材料的光学厚度 d 必须为中心反射波长的 $1/4$, 即高低折射率材料膜层厚度 t_H 和 t_L 分别满足

$$t_H = \lambda_0 / (4n_H), \quad t_L = \lambda_0 / (4n_L), \quad (1)$$

式中 λ_0 为中心波长。DBR 由 m 对高、低折射率膜层交替叠成, DBR 前后接触层的折射率分别为 n_0 和 n_s , 膜系上层为高折射率层, 且一般为 $2m+1$ 层, 假设材料无吸收损耗, 则对应中心波长 λ_0 的反射率可表示为

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

DBR 结构是用外延的方法交替沉积满足干涉相长条件的高、低折射率的多层结构。因此, 当层数达到一定的周期, 在中心波长 λ_0 范围内的光便可实现接近 100% 的反射。结合光学薄膜理论, 由(2)式可知, DBR 的反射率和半峰全宽都随两种材料折射率的变化而变化, 因此若要获得较好的 DBR 反射光谱, 需选择合适的折射率材料。

2.2 细致平衡理论

实验采用空间光谱(AM0, 辐照功率为 $136.7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$), 温度设为 300 K。为保证 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ 顶电

池、 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ 中电池与锗(Ge)底电池保持完全晶格匹配,计算得到镓的质量分数分别为 0.51 和 0.99,而 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ 顶电池、 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ 中电池的带隙 $E_{g,\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}}$ 、 $E_{g,\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}}$ 与 Ga 的组分 x 满足^[8]

$$E_{g,\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}} = 1.35 + 0.668x + 0.758x^2, \quad (3)$$

$$E_{g,\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}} = 0.36 + 0.63x + 0.43x^2, \quad (4)$$

利用(3)、(4)式计算得到顶、中电池带隙分别为 1.89 eV 和 1.40 eV。

参照文献[9]建立计算模型,假设各子电池的发射极厚度为 100 nm,且均匀掺杂,发射极施主掺杂浓度(体积分数) $N_d = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,基区受主掺杂浓度 $N_a = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。顶、中电池基区厚度设为可调节,以便更好地进行电池结构优化。由于 Ge 底电池厚度只影响自身的光子吸收率,对顶、中电池无影响,故将 Ge 底电池的厚度设为 150 μm 。

不考虑二极管影响因子和串联电阻的影响,理想的太阳电池的伏安特性方程可表示为

$$V = \frac{K_B T}{q} \left[\ln \left(\frac{J_{sc,1} - J}{J_{o,1}} + 1 \right) + \ln \left(\frac{J_{sc,2} - J}{J_{o,2}} + 1 \right) + \ln \left(\frac{J_{sc,3} - J}{J_{o,3}} + 1 \right) \right], \quad (5)$$

式中 q 为电子电量, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, $J_{sc,i}$ 、 $J_{o,i}$ ($i=1,2,3$) 分别表示电池正装后第 i 结电池的短路电流密度和暗电流密度。

各子电池的短路电流密度 J_{sc} 可表示为

$$J_{sc} = \int_0^\infty q \Phi_{inc}(\lambda) [1 + R(\lambda)] g_{QE}(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中 $\Phi_{inc}(\lambda)$ 为各子电池入射光谱在某一特定波长处的光子通量密度,顶电池的入射光子通量密度为 Φ_s ; $R(\lambda)$ 为电池受外延 DBR 结构影响并与波长有关的反射系数,它随外延 DBR 的位置变化而变化; $g_{QE}(\lambda)$ 为电池材料对光谱中某一波长光子的吸收效率。建立的计算模型考虑了实际情况下的量子效率、材料吸收系数、少子扩散长度、寿命和表面复合速度等因素的影响,具体计算方程参照文献[10]。以下各子电池的入射光子通量密度应是经过上面电池滤光后的部分,即中电池的入射光通量 $\Phi_s(\lambda) \exp[-\alpha_1(\lambda)t_1]$,依次类推,底电池的入射光通量 $\Phi_s(\lambda) \exp[-\alpha_1(\lambda)t_1] \exp[-\alpha_2(\lambda)t_2]$,其中 $\alpha_i(\lambda)$ 、 t_i ($i=1,2,3$) 分别代表第 i 节子电池的吸收系数和厚度。考虑到空间三结 GaAs 太阳电池电子辐照后 GaAs 中电池的电学性能衰减最为严重,故将 DBR 外延生长在 GaAs 中电池之下、Ge 底电池之上,使其反射相应波谱范围的光。中、顶电池可对经 DBR 反射的光进行二次吸收。底电池的反射系数 $R(\lambda)$ 为扣除分布式布拉格反射器的反射率 $r(\lambda)$,即 $1-r(\lambda)$,中电池对应的反射系数为 DBR 结构对应波长下的反射率经中电池滤过后的部分 $r(\lambda) \exp[-\alpha_2(\lambda)t_2]$,而顶电池的反射系数为 DBR 的反射率分别经过中、顶电池滤过后的部分 $r(\lambda) \exp[-\alpha_2(\lambda)t_2] \exp[-\alpha_1(\lambda)t_1]$ 。电池内部采用布拉格反射器增强中、顶电池的光吸收作用,使得太阳电池在保证减薄中电池基区厚度的前提下仍然具有较高的光电转换效率和较小的辐照电流衰减。对于光生电流远比中、顶电池大得多的 Ge 底电池而言,布拉格反射器起到了增反膜的作用,减少了其透过光子数,避免了大量光生电流的浪费。

J - V 特性曲线中的最大功率点(J_m, V_m)满足方程

$$\begin{cases} d(JV)/dJ = 0 \\ \eta = J_m V_m / P_{in} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 P_{in} 为 AM0 标准太阳平均辐照强度, $P_{in} = 136.7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$; η 为光电转化效率。通过计算 η 建立了电池光电转化效率 η 和 GaInP 顶、中电池厚度 t_1 、 t_2 之间的联系。

3 空间 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳电池的结构

3.1 DBR 材料的选择

从光谱来看,波长大于 880 nm 的红外光一般不会被 $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ 中间电池吸收。结合中电池对应的光的波长范围,考虑在中间电池基区的下面外延生长中心波长为 850 nm 的布拉格反射器,使其反射特定波长范围的光,从而提高中间电池的电流。该做法可以在保证电流不变的前提下,减薄中电池的基区,提高电池的抗辐照能力。

通过理论分析,结合材料的生长条件和晶格匹配,可供选择的嵌入到三结太阳能电池中的 DBR 材料主要有 AlAs/GaAs、AlInP/GaInP、AlInP/GaAs、GaInP/GaAs 和 $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ 5 种,其中 GaAs 材料的带隙较小,易吸收中电池波段的光,而生长高质量的 AlInP 材料较为困难。综上所述,最合适的 DBR 结构材料为不同组分的 $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ 材料。结合中心波长处材料的折射率大小,选择 $x=0.2$ 和 $y=0.9$,最终确定 DBR 结构为 $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$,折射率为 3.50/3.18,膜层厚度为 57/65 nm。

3.2 DBR 对数的选择

借助光学膜系设计软件,模拟 DBR 对数及反射率曲线。图 1 是中心波长为 850 nm 时,不同分布式布拉格反射器(DBR 对数分别为 10,15,20)对应的反射谱模拟结果。如图 1 所示,布拉格反射器的反射带宽为 760~840 nm,DBR 对数越大,反射效果越好。DBR 对数为 15 时中心波长处反射率大于 97%,DBR 对数为 20 对时中心波长处反射率接近 99%。结合 DBR 实际生长情况,可以得到 DBR 对数越大,外延质量越难保障,反射率反而会下降。结合图 2,使用分光光度计测试的 20 对 DBR 结构的反射率与 15 对基本一致,且 15 对 DBR 时测试的反射率与仿真结果也相差不大。综合考虑实际生长情况及材料成本,实验选择 15 对 DBR,对应中心波长处反射率接近 96%,完全满足设计要求。

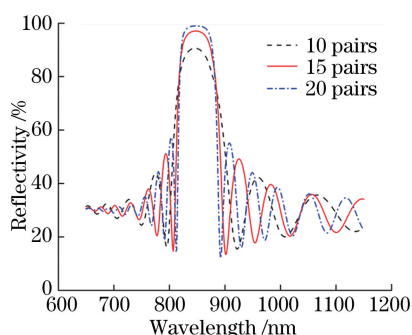


图 1 不同 DBR 对数下反射率随波长的变化关系

Fig. 1 Relationship between reflectivity and wavelength for different pairs of DBR

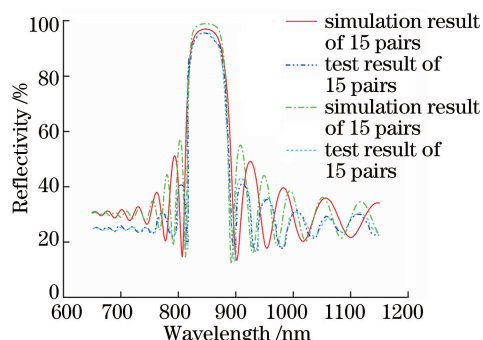


图 2 15 对和 20 对 DBR 外延结构的模拟和实测反射谱

Fig. 2 Simulated and measured reflectance spectra of epitaxial structures with 15-pair and 20-pair DBR

3.3 包含 DBR 结构电池的抗辐照设计

通过优化 DBR 材料生长温度、厚度等生长工艺,严格控制组成材料组分,将 DBR 结构导入到电池外延结构中。具体电池结构如图 3 所示,在中电池之下、隧穿结之上,外延生长包含 15 个周期的分布式布拉格反射器,为验证其抗辐照性能,将原电池结构作为对照。DBR 结构对短波长光子具有较强的反射作用,使得中、顶电池对其反射的光子进行二次吸收,这不仅补偿了基区减薄后光吸收减弱的影响,同时克服了电池受电子辐照后光电性能的衰退。而对于 Ge 底电池,DBR 结构添加后犹如在其上方镀上了一层增反膜,降低了光生电流,避免大量光生电流浪费。第 4.1 节将对空间用 $Ga_{0.51}In_{0.49}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ 三结太阳能电池各子电池厚度进行优化,以保证太阳能电池具有较高光电转化效率的同时,最大化节约材料成本。

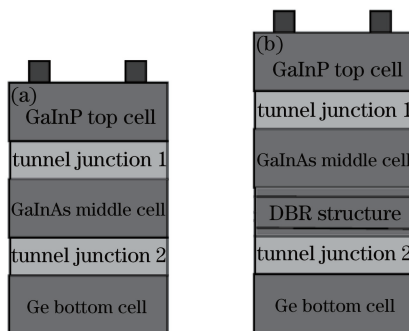


图 3 (a) 原电池结构 A; (b) 包含 DBR 电池结构 B

Fig. 3 (a) Original cell structural A; (b) cell structure B with DBR

4 结果与讨论

4.1 电池厚度优化

厚度是影响太阳能电池光电转化效率的又一关键因素,通过调整电池厚度可以将太阳光谱在各子电池之间进行更精细的分配,从而提高器件的转化效率。首先优化了电池结构 A、B 各子电池厚度。对于串联多节电池,整个器件的输出电流取决于各子电池中最小的光电流。由于底电池电流远大于顶、中电池,器件的输出电流只与 $J_{sc,1}$ 、 $J_{sc,2}$ 有关。在优化顶、中电池厚度时,若要提高整个器件的转化效率,则需在保证顶、中电池电流匹配的前提下,电流取最大。如图 4(a) 所示,当顶、中电池厚度分别增加到 $0.60 \mu\text{m}$ 和 $2.93 \mu\text{m}$,顶、中电池电流密度分别为 203.55 mA/cm^2 和 200.64 mA/cm^2 ,电流匹配度最优,理论转化效率最高达 40.02% 。此厚度组合也作为接下来验证 DBR 的抗辐照性能时原电池结构 A 的最佳厚度组合。随着顶、中电池基区厚度继续增加,少子扩散长度小于基区厚度,更多的电子空穴对在未扩散到空间电荷区就复合了,使得被内建电场扫射到 p-n 结两边的有效电子空穴对减少,此时不仅未形成有效的光生电流,反而使得此量子效率下降。图 4(b) 为将中电池 $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ 减薄后,外延生长 15 个周期的分布式布拉格反射器得到的理论转化效率等高图。如图 4(b) 所示,顶、中电池最优厚度组合为 $t_1 = 0.61 \mu\text{m}$, $t_2 = 2 \mu\text{m}$,中电池厚度最大时理论转化效率最高,此厚度组合也是下面进行 DBR 抗辐照设计时新电池结构 B 选取的厚度。考虑到电子辐照后 $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ 中电池的少子寿命大幅缩短,进而影响少子扩散长度,实验另外选取顶电池厚度分别为 t_1 为 $0.53 \mu\text{m}$ 、 $0.59 \mu\text{m}$ 以及中电池厚度 t_2 为 $1.2 \mu\text{m}$ 、 $1.6 \mu\text{m}$ 两组厚度组合进行对照实验,它们的理论转换效率分别为 44.2% 和 45.4% ,明显高于此两组顶、中电池厚度组合下原电池结构 A 分别对应的理论转化效率(42.1% 和 43.8%)。

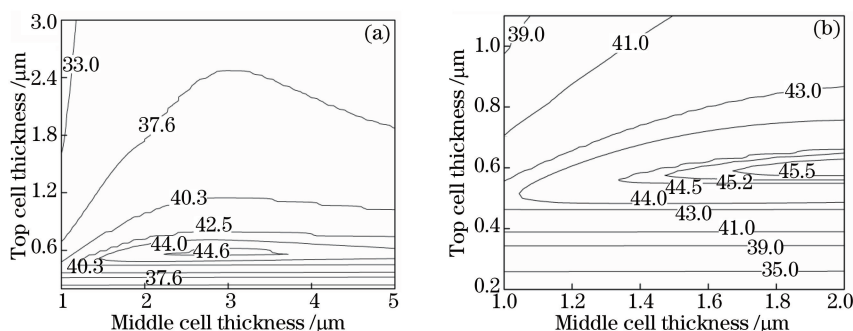


图 4 以顶、中电池厚度为变量的电池理论转化效率等高图。(a)原电池结构 A; (b)包含 DBR 电池结构 B

Fig. 4 Contour plots of theoretical conversion efficiency as a function of thickness of top and middle cells.

(a) Original cell structure A; (b) cell structural with DBR

4.2 DBR 及电池实验制备

实验采用低压金属有机物化学气相沉积(LP-MOCVD)设备进行外延生长。生长中三甲基镓(TMGa)、三甲基铟(TMIn)等金属有机化合物作为 III 族源,砷烷(AsH_3)、磷烷(PH_3)作为 V 族源,n 型掺杂源为氢气(H_2)稀释的硅烷(SiH_4),p 型掺杂源为二甲基锌(DMZn),生长温度控制在 $600 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 。新电池结构 B 首先生长 15 个周期(每个周期包括层厚为 57 nm 的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 和层厚为 65 nm 的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$)结构的布拉格反射器,将其外延生长在中电池之下、隧道结之上,具体外延结构如图 3 所示,外延片生长结束后进行蒸镀金属电极、减反膜、划片等后续器件加工工艺,制备了面积为 $5.5 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ 的太阳电池芯片。

4.3 包含 DBR 结构电池的抗辐照验证

为研究电子辐照对 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳能电池电流衰减的影响,实验选用型号为 ELV-8II 的电子加速器对太阳能电池进行 1 MeV 辐照实验。根据地面等效模拟加速实验的等效模拟区间,选取电子通量为 $10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,累积注量为 10^{15} cm^{-2} 。参照太阳电池的国际测试标准^[11],在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 AM0(辐照功率为 $136.7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)条件下,对辐照前后电池样品电学性能参数进行测试。图 5 为中电池厚度分别为 2.93 、 2.00 、 1.60 、 $1.20 \mu\text{m}$ 的原电池结构 A 顶、中电池的光谱响应,图中 EQE 代表外量子效率。由图 5 可见, $800 \sim 900 \text{ nm}$ 波长范围内的 $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ 中间电池光谱响应随着基区减薄下降明显,这是因为短波光光子更容易被基区上部所吸收,扩散长度的缩短使得长波光光子未被有效收集。图 6 为包含 DBR 的新电池结构中电池厚度减薄至 2.0 、 1.6 、 $1.2 \mu\text{m}$ 后测得的顶、中电池的光谱响应。为便于对照,中电池厚度为 $2.93 \mu\text{m}$ 的原电池

结构的光谱响应也一并列出。对照图 5,新电池结构在800~900 nm波长范围内的光谱响应要远高于原电池结构 A。通过计算得到,中电池厚度为 2.93 μm 的原电池结构的中、顶电池电流密度分别为 17.2 mA/cm^2 和 17.4 mA/cm^2 ,而中电池厚度减薄为 2 μm 时新电池结构的电流密度分别为 17.3 mA/cm^2 和 17.4 mA/cm^2 ,略高于原电池结构,这表明生长的 15 个周期的 DBR 结构起到了良好的反射作用,顶、中电池对反射光进行二次吸收,超额弥补了由中电池基区减薄导致的光子吸收减弱,从而达到了设计的目的。

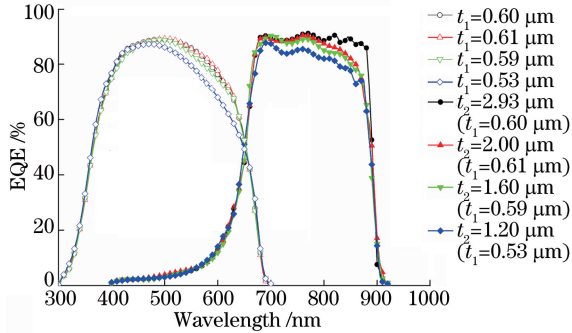


图 5 原电池结构 A 不同顶、中电池厚度的光谱响应
Fig. 5 Spectral response of original cell A under different thicknesses of top and middle cells

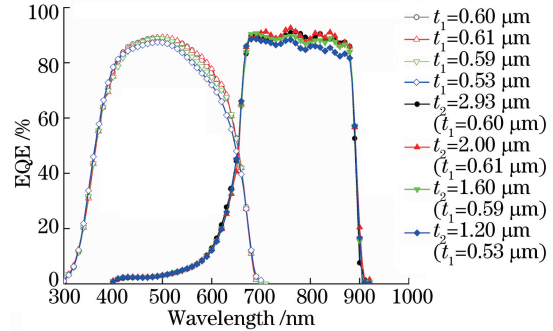


图 6 新电池结构 B 不同顶、中电池厚度的光谱响应
Fig. 6 Spectral response of new cell B under different thicknesses of top and middle cells

表 1 定义的最优值为相同生长条件下辐照前效率最优的电池芯片对应的电学性能参数,这也是图 5 和图 6 光谱响应对应的电池结构。对两种电池结构的 20 颗电池芯片的电学性能参数的误差分析表明相同生长条件下电池的电学性能极为接近,因此接下来只对具有代表性的效率最优的一组电池进行分析。辐照前后电学性能参数的比值用剩余因子表示,它是衡量电池抗辐照性能的一个重要指标。如表 1 所示,两种电池结构辐照前后 V_{oc} 变化较小,而新结构的太阳能电池辐照后 J_{sc} 剩余因子由原结构的 93.5% 提升了 2%~3%,电流衰减近 50%。添加 DBR 结构可提升太阳能电池电流抗辐照性能,效率的剩余因子也由原结构的 83.0% 提升了 2%。对照不同中电池厚度的 DBR 新电池结构可以发现,中电池厚度为 1.6 μm 的太阳能电池较 2 μm 太阳能电池辐照后短路电流剩余因子提高了近 1%,故效率的剩余因子也提高了近 1%,两者的光电转化效率基本接近,这可能是由于辐射注量的增加导致少子扩散长度缩短,2.0 μm 电池厚度已经远超过少子扩散长度,使得少子在未被收集前就被复合掉了;而对于 1.2 μm 的电池厚度,由于产生的光生载流子数目有限,未达到理想的光生电流。综上所述,新电池结构 B 的电流抗辐照能力要优于原结构 A,添加的 DBR 结构改善了辐照后电流的衰减,极大地提升了中电池的抗辐照性能。此外,虽然由表 1 的辐照性能数据可以看出,1.6 μm 中电池厚度的新电池结构 B 无论从效率还是材料成本方面都较 1.2 μm 和 2.0 μm 厚电池有明显的优越性,但是这里并未对辐照后电池的性能衰减进行量化处理,因此接下来还需要对太阳能电池辐照后的性能衰减进行大量的实验验证,得出更优电池厚度的具体数值。

表 1 两种结构电池辐照前后性能对比

Table 1 Performance comparison of two cells before and after electron irradiation

Condition	Parameter	$t_2 / \mu\text{m}$							
		2.93 ($t_1=0.60 \mu\text{m}$)		2.00 ($t_1=0.61 \mu\text{m}$)		1.60 ($t_1=0.59 \mu\text{m}$)		1.20 ($t_1=0.53 \mu\text{m}$)	
		Champion	Average	Champion	Average	Champion	Average	Champion	Average
Before irradiation	J_{sc}/mA	4.300	4.265	4.325	4.308	4.263	4.230	4.175	4.141
	V_{oc}/V	2.687	2.675	2.699	2.692	2.712	2.689	2.721	2.710
	$\eta / \%$	29.41	29.11	29.37	29.02	29.06	28.80	28.38	28.10
After irradiation	J_{sc}/mA	4.021	4.000	4.130	4.105	4.114	4.090	4.033	3.990
	V_{oc}/V	2.445	2.430	2.452	2.441	2.462	2.450	2.473	2.461
	$\eta / \%$	24.41	24.11	24.89	24.66	24.87	24.59	24.26	24.05
Remaining factor	J_{sc}/mA	93.5	—	95.5	—	96.5	—	96.6	—
	V_{oc}/V	91.0	—	90.9	—	90.8	—	90.9	—
	$\eta / \%$	83.0	—	84.7	—	85.6	—	85.5	—

5 结 论

通过对 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳能电池的 DBR 结构进行抗辐照设计,发现 15 对 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 高低折射率材料组成的 DBR 结构在保证高反射率的同时可最大化地节约材料成本。通过对原电池结构和新电池结构分别进行厚度优化,发现添加 DBR 的新电池结构的太阳能电池可明显改善辐照后电流的衰减,提升电池的抗辐照能力。此外,厚度为 $1.6\ \mu\text{m}$ 的新电池结构较厚度为 $1.2\ \mu\text{m}$ 和 $2.0\ \mu\text{m}$ 的电池在改善中电池的抗辐照方面具有更明显的优势,在保证电池高转化效率的同时节约了材料成本。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Zheng Shuwen, Fan Guanghan, Zhang Yong, *et al.* Progress in distributed Bragg reflector for light-emitting diodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(12): 29-35.
郑树文, 范广涵, 章勇, 等. 基于 LED 应用的分布布拉格反射器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(12): 29-35.
- [3] Lu Wengao, Sun Qizhen, Wo Jianghai, *et al.* High sensitivity micro-vibration sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728006.
鲁文高, 孙琪真, 沃江海, 等. 基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0728006.
- [4] Duerinckx F, Kuzma-Filipek I, Van Nieuwenhuysen K, *et al.* Simulation and implementation of a porous silicon reflector for epitaxial silicon solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, 16(5): 399-407.
- [5] Zhou Zhou, Zhou Jian, Sun Xiaowei, *et al.* Design of an irregularly shaped DBR for thin film solar cells[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0731002.
周舟, 周健, 孙晓玮, 等. 薄膜太阳能电池异型布拉格背反射结构设计及制作[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0731002.
- [6] Wu Yiyong, Yue Long, Hu Jianmin, *et al.* Predictions of degradation of electrical properties of GaInP₂/GaAs/Ge solar cell using equivalent displacement-damage-dose technique[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(4): 329-336.
吴宜勇, 岳龙, 胡建民, 等. 等效位移损伤剂量法预测 GaInP₂/GaAs/Ge 三结电池在轨性能退化规律[J]. *航天器环境工程*. 2011, 28(4): 329-336.
- [7] Chang Xiaoyang, Yao Shun, Zhang Qiling, *et al.* Anti-radiation of space triple-junction solar cell based on distributed Bragg reflector structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(10): 342-348.
常晓阳, 尧舜, 张奇灵, 等. 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[J]. *物理学报*, 2016, 65(10): 342-348.
- [8] Abram F I. *Physical Properties of Semiconductors* [EB/OL]. Russia: Ioffe Institute (2015-01-22) [2017-04-24]. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>.
- [9] Faine P, Kurtz S R, Olson J M, *et al.* Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell and coating thicknesses as adjustable parameters[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(4): 1890-1895.
- [10] Luque A, Hegedus S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*[M]. New York: Wiley, 2011: 323-326.
- [11] ASTM Standard, E2236-10, Standard test methods for measurement of electrical performance and spectral response of nonconcentrator multijunction photovoltaic cells and modules[S]. West Conshohocken: PA, 2012