

# 锆掺杂磁控直拉单晶硅太阳能电池

杜永超<sup>1,†</sup> 徐寿岩<sup>1</sup> 刘 峰<sup>2</sup>

(1 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300381)

(2 中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

**摘要:** 介绍了锆掺杂浓度为  $(1\sim 1.5)\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$  的  $10\Omega\cdot\text{cm}$  磁控直拉单晶硅衬底上 BSFR(back surface field and reflection)和 BSR(back surface reflection)太阳能电池的制备和电性能. BSR 锆掺杂单晶硅太阳能电池的 AM0 效率最高为 12.3%. BSFR 锆掺杂单晶硅太阳能电池的 AM0 效率达到 15%. 利用 1MeV 的高能电子对制备的锆掺杂单晶硅太阳能电池进行了辐照实验. 作为对比, 对全部常规  $10\Omega\cdot\text{cm}$  的 CZ 单晶硅太阳能电池也进行了实验. 结果表明, 锆掺杂浓度为  $(1\sim 1.5)\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$  的磁控直拉单晶硅太阳能电池的电性能和抗辐照性能与常规直拉硅太阳能电池基本相同. 利用锆掺杂磁控直拉单晶硅片机械强度较高的优点, 可以降低太阳能电池生产过程破损率.

**关键词:** 锆掺杂单晶硅; 太阳能电池; 抗辐照

**PACC:** 6170W; 8630J; 7280

**中图分类号:** TN914.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)S0-0328-04

## 1 前言

太阳能电池的电性能和抗辐照特性是空间太阳设计必须考虑的重要参数. 提高太阳能电池效率的方法有织化表面、钝化发射结、背表面场和优化减反射膜等. 在太阳能电池的抗辐照特性方面, 除了减薄电池基体厚度、织化太阳能电池表面、封装抗辐照玻璃盖片等手段有助于提高太阳能电池抗辐照特性之外, 在单晶硅中掺入特定的物质, 改善单晶硅材料的性质, 也可以提高单晶硅太阳能电池的抗辐照特性. 前苏联曾经研制过掺入锂和钷的单晶硅太阳能电池, 该类太阳能电池的末期功率比未掺杂的单晶太阳能电池有一定程度的提高.

在单晶硅中掺入锆后, 随着掺锆浓度的提高, 硅材料的禁带宽度会逐渐变窄<sup>[1]</sup>, 而且掺锆后的硅材料机械强度有很大程度的提高<sup>[2]</sup>. 曾经有资料报道单晶硅掺入锆后其抗辐照特性有所提高, 单晶经过辐照后的少数载流子寿命下降较少. 为了验证锆掺杂单晶硅在空间太阳能电池方面应用的可能性, 我们采用锆掺杂浓度为  $(1\sim 1.5)\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$  的磁控直拉单晶硅材料和常规直拉单晶硅材料, 制备了 BSR 和 BSFR 太阳能电池, 并对电性能、抗辐照性能和光学特性进行了比较. 发现单晶硅掺入上述浓度的锆后, 太阳能电池电性能保持在一个较高的水平, 而太阳能电池的抗辐照性能与常规接拉晶硅太阳能电池基本相同.

## 2 太阳能电池的制备

单晶硅太阳能电池的制备材料采用了锆掺杂磁控直拉单晶硅和常规直拉单晶硅. 锆掺杂单晶硅的晶向为  $\langle 100 \rangle$ , 掺硼 p 型, 电阻率为  $8\sim 12\Omega\cdot\text{cm}$ , 氧含量为  $(4\sim 5)\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ , 碳含量  $< 1\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 锆含量为  $(1\sim 1.5)\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ , 少子寿命为  $200\sim 300\mu\text{s}$ ; 常规直拉单晶硅的晶向及电阻率与锆掺杂单晶相同, 氧含量  $< 1.3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 碳含量  $< 5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 少子寿命大于  $60\mu\text{s}$ . 两种单晶硅片均用化学腐蚀的方法减薄到  $0.23\text{mm}\pm 0.02\text{mm}$ , 然后按图 1 的流程经过背场、发射结、蒸镀电极、划片、减反射膜等工艺过程制备 BSFR(back surface field and reflection)  $20\text{mm}\times 40\text{mm}$  太阳能电池. BSR(back surface reflection)太阳能电池的制备流程与 BSFR 相比, 只是缺少背场制备的工艺过程, 其余工艺过程均完全相同. 在加工过程中, 两种材料太阳能电池的同道工序都尽量同时加工, 掺锆硅片表现出了良好的工艺兼容性; 常规直拉单晶硅片有少量裂损, 而锆掺杂单晶硅片无一损失, 表 1 为两种单晶硅片破损率的统计.

表 1 锆掺杂磁控直拉单晶硅片和常规直拉单晶硅片的损失情况

Table 1 Lost cells in the processing

硅片种类	投产数/片	破损数/片	破损率/%
掺锆硅片	72	0	0
常规硅片	72	6	8.3

† 通信作者. Email: duyongchao@sina.com

2005-12-08 收到, 2006-01-24 定稿

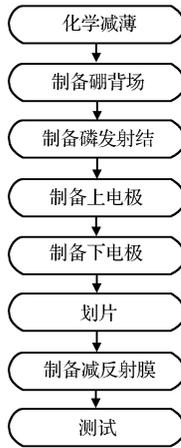


图1 BSFR 单晶硅太阳能电池制备流程简图

Fig.1 BSFR solar cells manufacture flow chart

### 3 实验

用两种单晶硅材料制备的太阳能电池样品在 AM0 光谱分布, 光强  $136.7\text{mW}/\text{cm}^2$ , 温度  $25^\circ\text{C}$  的条件下进行了电性能测试, 测试结果见表 2. 表 2 的电性能参数均为各种太阳能电池测试结果的平均数值.

表 2 锗掺杂磁控直拉单晶硅和常规直拉单晶硅太阳能电池性能

Table 2 Electrical performance of MCZ(Ge) silicon solar cells and CZ silicon solar cells

太阳能电池种类		短路电流 /A	开路电压 /V	光电转换效率 /%	填充因子
BSFR	CZ	0.336	0.607	15.03	0.774
	MCZ(Ge)	0.338	0.605	15.00	0.771
BSR	CZ	0.301	0.544	12.16	0.781
	MCZ(Ge)	0.304	0.540	12.16	0.779

太阳能电池电性能测试完成后, 进行了  $1\text{MeV}$  电子的辐照实验, 辐照剂量分别为  $7 \times 10^{14}$  和  $1.5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ . 对辐照后的太阳能电池进行了退火处理, 然后进行电性能测试, 表 3 和表 4 分别为  $7 \times 10^{14}$  和  $1.5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$  电子辐照后的电性能测试结果.

表 3 锗掺杂磁控直拉单晶硅和常规直拉单晶硅太阳能电池经  $7 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  电子辐照后的电性能Table 3 Electrical performance of MCZ(Ge) silicon solar cells and CZ silicon solar cells after  $7.0 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$   $1\text{MeV}$  electron radiation

太阳能电池种类		短路电流 /A	开路电压 /V	光电转换效率 /%	填充因子
BSFR	CZ	0.280	0.5143	10.08	0.767
	MCZ(Ge)	0.283	0.5116	10.11	0.763
BSR	CZ	0.277	0.5173	10.12	0.773
	MCZ(Ge)	0.281	0.5108	10.08	0.768

表 4 锗掺杂磁控直拉单晶硅和常规直拉单晶硅太阳能电池经  $1.5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$  电子辐照后的电性能Table 4 Electrical performance of MCZ(Ge) silicon solar cells and CZ silicon solar cells after  $1.5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$   $1\text{MeV}$  electron radiation

太阳能电池种类		短路电流 /A	开路电压 /V	光电转换效率 /%	填充因子
BSFR	CZ	0.252	0.4982	8.74	0.761
	MCZ(Ge)	0.256	0.4950	8.73	0.755
BSR	CZ	0.250	0.4987	8.76	0.769
	MCZ(Ge)	0.256	0.4942	8.79	0.760

## 4 分析和讨论

### 4.1 机械强度

虽然实验样品较少, 但是锗掺杂磁控单晶硅还是表现出了较好的机械强度, 表 1 中破损率数据说明了这一点, 这是因为硅中掺入等价元素锗后, 抑制了硅片中氧的非均匀成核沉淀的形成, 阻碍了晶格滑移和钉位错运动, 因而提高了硅片的机械强度<sup>[3]</sup>.

### 4.2 电性能

表 2 中两种太阳能电池的电性能参数都相当接近, 锗掺杂单晶硅太阳能电池的电性能稍稍低于常规直拉单晶硅太阳能电池. 锗掺杂 BSFR 和 BSR 单晶硅太阳能电池的开路电压分别为  $0.605$  和  $0.540\text{V}$ , 而常规直拉单晶硅太阳能电池的开路电压分别为  $0.607$  和  $0.544\text{V}$ . 锗掺杂单晶硅太阳能电池的平均开路电压稍低于常规直拉单晶硅太阳能电池, 这是由于锗掺杂硅材料的禁带收缩效率造成的. 硅材料中掺入锗后, 硅材料的禁带宽度发生变化, 随着掺锗浓度的提高, 硅材料的禁带宽度变窄. 而单晶硅太阳能电池的开路电压又与材料的禁带宽度存在着直接的正比关系, 禁带宽度越大, 太阳能电池的开路电压就越大. 所以, 当硅中掺入  $(1 \sim 1.5) \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$  的锗后, 其禁带宽度轻微收缩, 低于常规直拉硅材料的禁带宽度, 因此其开路电压也有少量的降低.

就短路电流而言, 锗掺杂 BSFR 和 BSR 单晶硅太阳能电池的短路电流分别为  $0.338$  和  $0.304\text{A}$ , 而常规直拉单晶硅太阳能电池的短路电流分别为  $0.336$  和  $0.301\text{A}$ . 锗掺杂单晶硅太阳能电池的短路电流稍高于常规直拉单晶硅太阳能电池, 主要是因为锗掺杂硅材料的禁带收缩效率造成的, 兼之太阳能电池基体内较低的氧和碳含量, 复合中心较少, 因而对较长波段的人射光利用有所提高, 这从图 2(a) 的锗掺杂单晶硅太阳能电池和常规太阳能电池外部量子响应曲线可以得到验证.

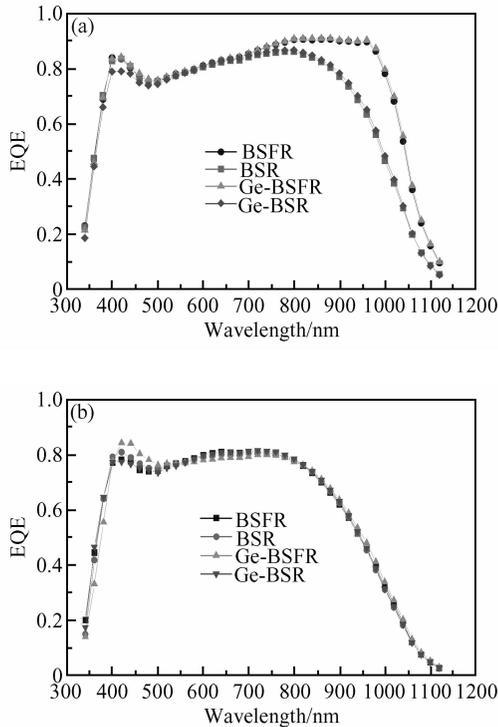


图 2 (a) 锗掺杂磁控单晶硅太阳电池和常规太阳电池外部量子响应曲线; (b) 锗掺杂磁控单晶硅太阳电池和常规太阳电池经  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  电子辐照后外部量子响应曲线  
Fig.2 (a) EQE(external quantum efficiency) of the MCZ(Ge) solar cells and CZ solar cells; (b) EQE of the MCZ(Ge) silicon solar cells and CZ silicon solar cells after  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  1MeV electron radiation

### 4.3 抗辐照性能

经过 1MeV 电子辐照后, 两种单晶材料的 BSFR 和 BSR 太阳电池的电性能都有所下降(见表 3,4). 这是因为在 高能粒子的作用下, 太阳电池基体材料产生位移缺陷, 形成大量的复合中心, 使少子寿命急剧降低. 经  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  的 1MeV 电子辐照后, 由于少子寿命的降低, 两种 BSFR 太阳电池的长波响应不再有优势, 基本与 BSR 太阳电池相同, 太阳电池的电性能经电子辐照后趋于一致(表 4). 同时, 从图 2(b) 两种单晶硅片制备的 BSFR 太阳电池和 BSR 太阳电池辐照后的外部量子响应曲线可以看到, BSFR 太阳电池辐照后的外部量子响应与 BSR 太阳电池几乎重合, 说明辐照后的 BSFR 和 BSR 太阳电池短路电流基本一致, 这也说明 BSFR 太阳电池的背场效应不再存在. 锗掺杂单晶硅太阳电池并没有表现出更好的抗辐照特性, 与常规直拉单晶硅太阳电池的抗辐照特性几乎完全相同.

### 4.4 光学特性

图 3(a) 中两种 BSFR 太阳电池的反射率曲线

几乎完全重合, 而 BSR 单晶硅太阳电池的表面反射率在波长 1100nm 前也基本重合, 但在波长 1100nm 以后锗掺杂 BSR 单晶硅太阳电池红外波段反射率高于常规直拉 BSR 单晶硅太阳电池. 虽然红外波段的入射光对短路电流没有贡献, 但是对于锗掺杂单晶硅太阳电池, 在红外波段较高的反射率可以使太阳电池的吸收系数降低, 降低太阳电池的在轨工作温度, 更适合于空间应用.

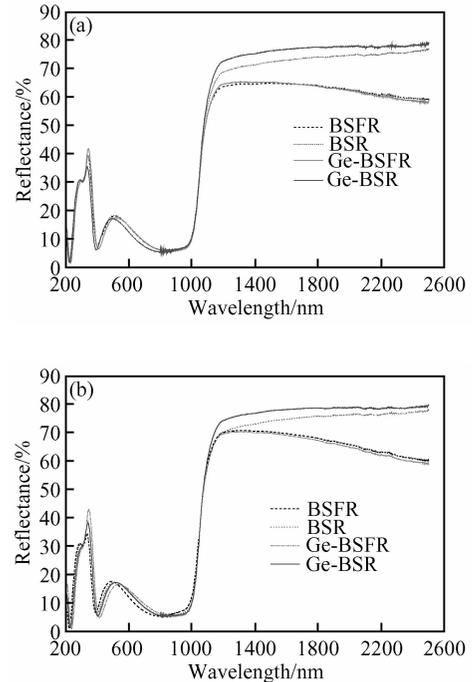


图 3 (a) 锗掺杂磁控单晶硅太阳电池和常规太阳电池上表面反射率曲线; (b) 锗掺杂磁控单晶硅太阳电池和常规太阳电池经  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  电子辐照后上表面反射率曲线  
Fig.3 (a) Reflectances of the MCZ(Ge) solar cells and CZ solar cells; (b) Reflectances of the MCZ(Ge) solar cells and CZ solar cells after  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  1MeV electron radiation

从图 3(b) 经电子辐照后的太阳电池表面反射率曲线可以看出, 两种单晶材料制备的同类型太阳电池的反射表面有相同的变化趋势: 两种 BSR 太阳电池的表面反射率基本无变化, 而两种 BSFR 太阳电池的在红外波段的表面反射率有所升高, 但是还是低于 BSR 太阳电池. 辐照后太阳电池的吸收系数还是高于 BSR 太阳电池, 意味着寿命末期电性能相同的 BSFR 太阳电池输出功率低于 BSR 太阳电池的输出功率. 同样, 辐照后的锗掺杂 BSFR 太阳电池在红外波段相对常规 BSFR 太阳电池有较高的反射率.

由于参试的 BSFR 太阳电池和 BSR 太阳电池都是同批制备的, 而且表面反射率的测试也是连续完成的, 所以太阳电池的表面反射真实反映了太阳

电池的光学特性,至于辐照前后表面反射变化的机理,目前还不是很清楚,有待于进一步研究.

## 5 结论

采用锗掺杂浓度为 $(1\sim 1.5)\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的p型磁控直拉单晶硅材料制备的太阳电池的电性能、抗辐照性能、光学特性均与常规直拉单晶硅材料制备的太阳电池非常接近,由于掺锗单晶硅材料的机械强度的提高,太阳电池的生产过程和组装过程中破损率还有一定程度的降低,使太阳电池阵的可靠性得到了提高.所以,该掺杂浓度下的单晶硅材料可以用于空间太阳电池的制备,但是在电性能和抗辐照特性方面并没有什么特殊的优势.

由于条件的限制,在实验过程中,只对锗掺杂浓度为 $(1\sim 1.5)\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的p型磁控直拉单晶硅材料进行了对比实验,更高锗掺杂浓度的单晶硅材料

在太阳电池方面的实验将于适当的机会展开.

## 参考文献

- [1] Jiang Xiaobo, Ye Zhizhen. Application of GeSi material in the micro electron and photoelectron. Mater Sci Eng, 1996, 14(3):18 (in Chinese)[姜小波,叶志阵. 锗硅材料在微电子、光电子方面的应用. 材料科学与工程, 1996, 14(3):18]
- [2] Ji Zhijiang, Zhang Weilian, Liu Caichi. The effects of the germanium in silicon on the silicon wafers mechanical intensity. Semiconductor Technology, 1994, 10(5):33 (in Chinese)[冀志江,张维连,刘彩池. 硅中Ge对硅片机械强度的影响. 半导体技术, 1994, 10(5):33]
- [3] Niu Xinhuan, Zhang Weilian, Zhang Shuyu, et al. Growth and fundamental properties of SiGe single crystal. The Proceedings of the 14th National Conference on Integrated Circuit and Silicon Materials, 2005, Part B:316 (in China)[牛新环,张连维,张书玉,等. SiGe单晶的生长及其性能的研究. 第十四届全国半导体集成电路、硅材料学术年会论文集, 2005, 下集:316]

## Solar Cells on MCZ(Ge) Silicon Substrates

Du Yongchao<sup>1,†</sup>, Xu Shouyan<sup>1</sup>, and Liu Feng<sup>2</sup>

(1 Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300381, China)

(2 No. 46 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China)

**Abstract:** MCZ(Ge)(magnetically confined Czochralski,germanium doped) silicon wafers have been used in semiconductor industry wider and wider because of its higher mechanical intensity and frequency property. In this paper, the electrical performance of solar cells on MCZ(Ge) silicon substrates is introduced. The best BOL(begin of life) AM0 efficiency of the MCZ(Ge) BSFR solar cells is 15%, and the best BOL AM0 efficiency of MCZ(Ge) BSR solar cells is 12.3%. The 1MeV electron radiation experiment is carried for some MCZ(Ge) solar cells. For comparison, normal CZ BSFR solar cells and BSR solar cells are fabricated and tested. The electrical performance and radiation resistance of MCZ(Ge) solar cells are almost the same as those of normal CZ solar cells.

**Key words:** MCZ(Ge); solar cells; radiation resistance

**PACC:** 6170W; 8630J; 7280; 8110J

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0328-04

† Corresponding author. Email: duyongchao@sina.com

Received 8 December 2005, revised manuscript received 24 January 2006