

# 提高微晶硅薄膜太阳能电池效率的研究\*

张晓丹<sup>†</sup> 赵颖 高艳涛 陈飞 朱锋 魏长春 孙建 耿新华 熊绍珍

(南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 天津 300071)

(南开大学光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室, 天津 300071)

(2006年3月29日收到, 2006年8月15日收到修改稿)

采用甚高频等离子体增强化学气相沉积技术制备了系列微晶硅薄膜太阳能电池, 指出了气体总流量和背反射电极的类型对电池性能参数的影响. 电池的  $I-V$  测试结果表明: 随反应气体总流量的增加, 对应电池的短路电流密度、开路电压和填充因子都有很大程度的提高, 结果使得电池的光电转换效率得以提高. 另外,  $ZnO/Ag/Al$  背反射电极能明显提高电池的短路电流密度, 进而也提高了电池的光电转换效率. 对气体总流量和背反射电极类型影响电池效率的原因进行了分析.

关键词: 微晶硅薄膜太阳能电池, 气体流量,  $ZnO/Ag/Al$  背反射电极

PACC: 8630J, 8115H, 7360F

## 1. 引言

微晶硅薄膜太阳能电池已成为硅基薄膜太阳能电池的研究热点<sup>[1-3]</sup>. 这是由于微晶硅薄膜太阳能电池与非晶硅薄膜太阳能电池组成叠层电池可充分地利用太阳光谱, 使得电池的光电转换效率提高. 要获得更高效率的非晶硅/微晶硅叠层电池<sup>[4]</sup>, 制备出高效率的单结微晶硅薄膜太阳能电池是前提条件之一. 在国外, 单结微晶硅太阳能电池的效率虽然已接近 10%<sup>[5]</sup>, 但有许多问题尚未解决. 在国内, 经过近几年的研究, 对微晶硅材料的认识已逐步深入<sup>[6-10]</sup>, 同时在微晶硅薄膜太阳能电池的研究方面也取得了一定的成果<sup>[11, 12]</sup>.

本文主要通过改变气体总流量和背反射电极的类型, 研究制备微晶硅薄膜太阳能电池性能参数的变化规律, 为进一步提高微晶硅薄膜太阳能电池的效率提供依据.

## 2. 实验

实验中所有电池都是在辐射型多功能化学气相

沉积系统(cluster CVD)中制备. 实验的本底真空保持在  $5.0 \times 10^{-6}$  Pa 左右. 其中电池中的 p 层和 i 层所用的激发频率为 60 MHz, 而 n 层采用的是射频(13.56 MHz)激励源. 每个硅烷浓度系列电池中的 p 层和 n 层的条件都固定不变. 电池有源 i 层硅烷浓度的变化范围为 4%—5.5%. B 系列电池有源 i 层的气体总流量是 A 系列电池的 2.4 倍, 其他条件相同.

电池的结构是 p-i-n 型, 电池的  $I-V$  特性测试所用光强为  $AM1.5(100 \text{ mW/cm}^2)$ . 电池的厚度通过 Xp-2 型台阶仪测试.

## 3. 结果及讨论

### 3.1. 气体总流量对微晶硅薄膜太阳能电池性能的影响

图 1 给出了两个不同硅烷浓度系列(4%—5.5%) , 在辉光功率和气体压力相同而流量不同的条件下制备微晶硅薄膜太阳能电池各性能参数测试结果. 电池的基本结构是玻璃/氧化锌/微晶硅 p 层/微晶硅 i 层/非晶硅 n 层/铝. A 系列电池的厚度小于

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000028202, G2000028203)、国家自然科学基金(批准号:60506003)、天津市自然科学基金(批准号:05YFJMJC01600)、科学技术部国际合作计划(批准号:2005197)和教育部新世纪优秀人才支持计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: xdzhang@nankai.edu.cn

1.0  $\mu\text{m}$ , B 系列电池的厚度都在 1.2  $\mu\text{m}$  左右. 从图 1 (a) 可以看出: 总的趋势是电池的开路电压  $V_{oc}$  随硅烷浓度的增加而逐渐增加, 相同的硅烷浓度条件下, 随气体总流量增大对应电池的开路电压  $V_{oc}$  提高. 这样的结果来源于材料的结构变化, 即材料的晶化程度随硅烷浓度或气体流量的增加而逐渐减小. 从图 1 (b) 短路电流密度  $J_{sc}$  的结果也可看出, 流量增大对应电池的短路电流密度  $J_{sc}$  增大, 原因是由于流量增大制备的电池质量得到了改善. 实际上, 电池的短路

电流密度  $J_{sc}$  与电池厚度有一定关系<sup>[13]</sup>. 由于 B 系列电池的厚度比 A 系列电池的厚度大, 因此, 一定程度上也提高了电池的短路电流密度  $J_{sc}$ . 图 1 (c) 表明, 随气体流量的增加, 对应电池的填充因子也得到了改善. 由此可见, 气体总流量增大后电池的各个性能参数都得到了明显改善, 结果使得电池光电转换效率得到了很大提高. 在没有使用 ZnO/Ag 背反射电极的情况下, 电池的效率达到了 7.1%.

实际上, 气体流量增加后主要是减少了反应物

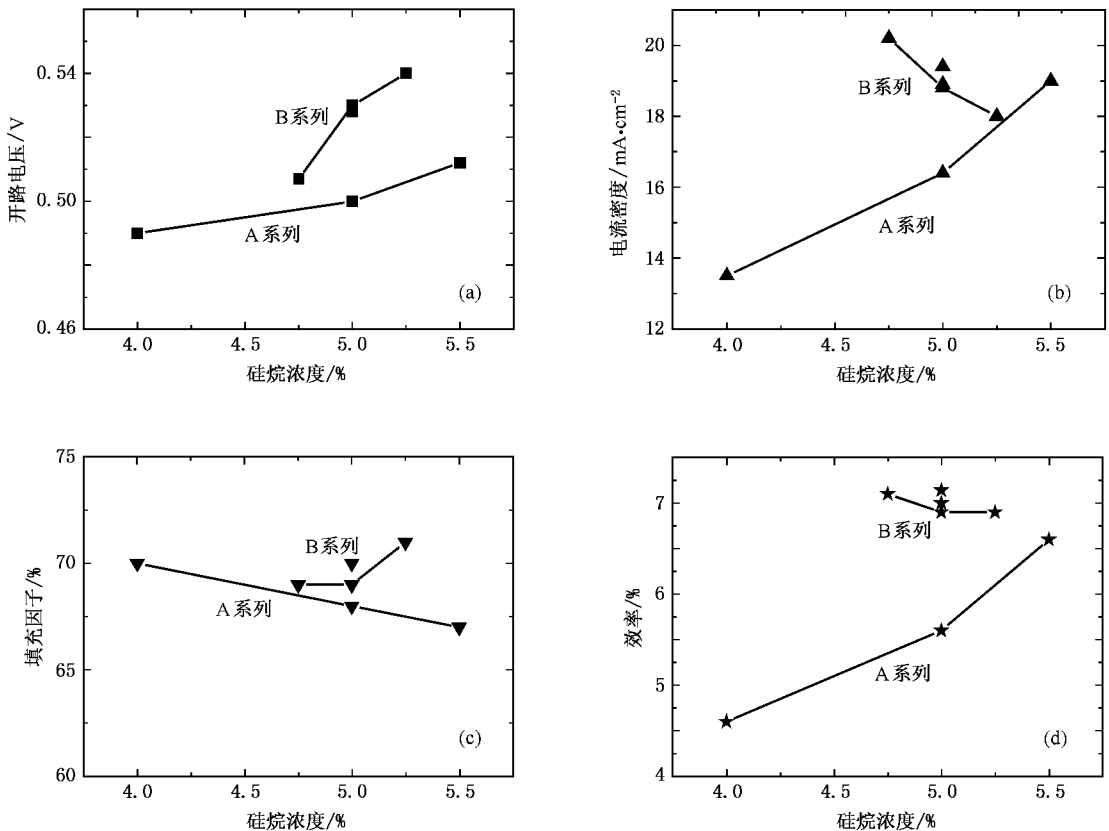


图 1 不同流量条件下电池开路电压 (a) 短路电流密度 (b) 填充因子 (c) 和转换效率 (d) 随硅烷浓度的变化

在反应室里的滞留时间  $\tau_{res}$ , 而滞留时间  $\tau_{res}$  与电极面积  $A$ 、电极间距离  $d_{el}$ 、沉积气压  $p_{dep}$  和气体总流量  $f_{total}$  有关<sup>[14]</sup>,

$$\tau_{res} = \frac{Ad_{el}p_{dep}}{f_{total}p_0},$$

式中  $p_0$  为标准大气压. 气体滞留时间的减少, 降低了高硅烷产生概率, 这样反应室中的气体就比较新鲜, 结果提高了制备电池的质量, 从而表现为各个性能参数都得到了提高.

### 3.2. 背反射电极对微晶硅薄膜太阳能电池性能的影响

作为微晶硅薄膜太阳能电池的背反射电极, 在很

大程度上决定着器件的性能<sup>[15]</sup>. 常用的背反射电极是 Ag, Al 以及 ZnO 与它们的组合. 图 2 给出了采用两种不同的背反射电极制备电池的  $I-V$  特性曲线, 其中 ZnO/Al 背反射电极是采用溅射的方法制备 ZnO 后再热蒸发 Al. 从图 2 可以看出, 采用 ZnO/Al 背反射电极后, 电池的短路电流密度得到了大幅度的提高, 从 19.5  $\text{mA}/\text{cm}^2$  增加到了 23  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . 这说明采用 ZnO/Al 背反射电极后, 增强了光在有源层中的吸收, 使得电池的短路电流密度得以提高.

从图 2 还可以看出, 电池的背反射电极采用 ZnO/Al 时, 其填充因子降低. 这是由于采用溅射技

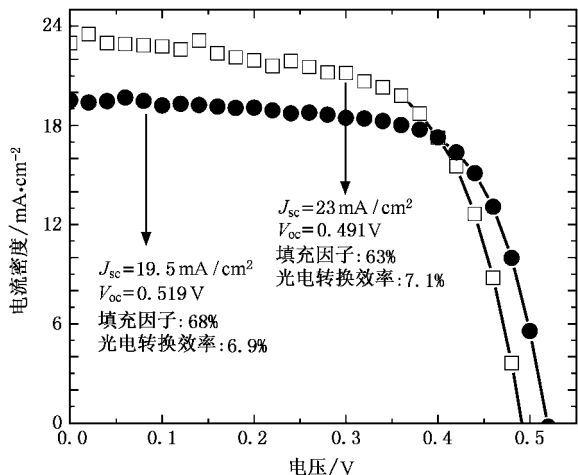


图2 采用 ZnO/Al 和 Al 背反射电极制备电池的  $I-V$  曲线 曲线 a 为 ZnO/Al 背反射电极 曲线 b 为 Al 背反射电极

术制备 ZnO 薄膜过程中,离子轰击使电池的  $i/n$  结特性变差所致.为此,采用金属有机物化学气相沉积方法制备了 ZnO 背反射电极,为进一步提高电池的短路电流密度,又热蒸发了 Ag 背反射电极.图 3 给出了 Al 背反射电极和 ZnO/Ag/Al 背反射电极制备电池的  $I-V$  特性测试结果.从图 3 中可以看出,ZnO/Ag/Al 背反射电极的使用,明显地提高了电池的开路电压和短路电流密度,最终使电池的光电转换效率达到了 8.7%.

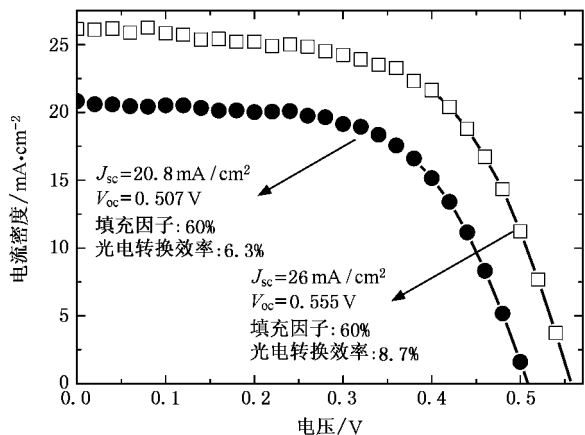


图3 采用 ZnO/Ag/Al 和 Al 背反射电极制备电池的  $I-V$  曲线 —□—为 ZnO/Ag/Al 背反射电极, —●—为 Al 背反射电极

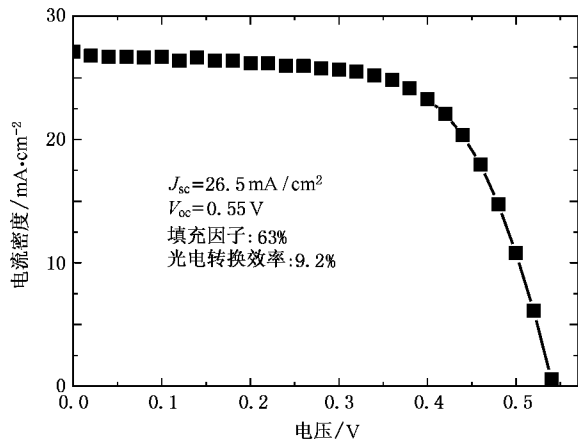


图4 高效率微晶硅薄膜太阳能电池的  $I-V$  曲线(背反射电极为 ZnO/Ag/Al)

### 3.3. 高效率微晶硅太阳电池的制备

通过以上分析可知,气体流量和背反射电极对微晶硅薄膜太阳能电池的性能有很大的影响.在上述参数综合优化的基础上,采用溅射腐蚀的 ZnO 薄膜作为前电极、在气体流量为  $240 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、背反射电极为 ZnO/Ag/Al 的情况下,获得了光电转换效率达 9.2% 的单结微晶硅薄膜太阳能电池.从图 4 可以看出,电池的短路电流密度  $J_{sc}$  达到了  $26.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、开路电压  $V_{oc}$  为 0.55 V、填充因子为 63%.

## 4. 结 论

采用甚高频等离子体增强化学气相沉积技术制备了系列微晶硅薄膜太阳能电池.结果表明:反应气体总流量增加,即反应物在反应室中滞留时间的减小,有利于提高微晶硅薄膜太阳能电池的各个性能参数,结果使得电池的光电转换效率得到了提高.另外,与 Al 电极和 ZnO/Al 电极相比,ZnO/Ag/Al 背反射电极很大程度地提高了电池短路电流密度,与此同时,还能使其他的性能参数保持不变或有所提高,从而明显地提高了电池的光电转换效率.通过对各个参数的综合优化,获得了光电转换效率达 9.2% 的单结微晶硅薄膜太阳能电池.

- [ 1 ] Shah A , Meier J , Vallat-Sauvain E *et al* 2002 *Thin Solid Films* **403—404** 179
- [ 2 ] Saitoh K , Ishiguro N , Yanagawa N *et al* 1996 *J. Non-cryst. Solids* **198—200** 1093
- [ 3 ] Rech B , Roschek T , Muller J *et al* 2001 *Solar Energy Mater. Solar Cells* **66** 267
- [ 4 ] Meier J , Dubail S , Golay S *et al* 2002 *Solar Energy Mater. Solar Cells* **74** 457
- [ 5 ] Mai Y , Klein S , Carius R *et al* 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 114913
- [ 6 ] Zhang X D , Zhao Y , Zhu F *et al* 2005 *Appl. Surf. Sci.* **245** 1
- [ 7 ] Zhang X D , Zhao Y , Zhu F *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 445 ( in Chinese ) [ 张晓丹、赵颖、朱锋等 2005 物理学报 **54** 445 ]
- [ 8 ] Zhu F , Zhang X D , Zhao Y *et al* 2004 *Chin. J. Semicond.* **25** 1700 ( in Chinese ) [ 朱锋、张晓丹、赵颖等 2004 半导体学报 **25** 1700 ]
- [ 9 ] Gao X Y , Li R , Chen Y S *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 98 ( in Chinese ) [ 郜小勇、李瑞、陈永生等 2006 物理学报 **55** 98 ]
- [ 10 ] Zhou B Q , Liu F Z , Zhu M F *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2173 ( in Chinese ) [ 周丙卿、刘丰珍、朱美芳等 2005 物理学报 **54** 2173 ]
- [ 11 ] Zhang X D , Zhao Y , Gao Y T *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1899 ( in Chinese ) [ 张晓丹、赵颖、高艳涛等 2005 物理学报 **54** 1899 ]
- [ 12 ] Zhang X D , Zhao Y , Zhu F *et al* 2005 *Chin. J. Semicond.* **26** 52 ( in Chinese ) [ 张晓丹、赵颖、朱锋等 2005 半导体学报 **26** 52 ]
- [ 13 ] Vetterl O , Lambertz A , Dasgupta A *et al* 2001 *Solar Energy Mater. Solar Cells* **66** 345
- [ 14 ] Roschek T , Rech B , Muller T *et al* 2004 *Thin Solid Films* **451—452** 466
- [ 15 ] Keppner H , Meier J , Torres P *et al* 1999 *Appl. Phys. A* **69** 169

## Investigation of improved conversion efficiency of microcrystalline silicon thin film solar cells<sup>\*</sup>

Zhang Xiao-Dan<sup>†</sup> Zhao Ying Gao Yan-Tao Chen Fei Zhu Feng Wei Chang-Chun  
Sun Jian Geng Xin-Hua Xiong Shao-Zhen

( *Institute of Photo-electronic Thin Film Devices and Technology , Nankai University , Tianjin 300071 , China* )

( *Key Laboratory of Photo-electronic Thin Film Devices and Technology of Tianjin , Nankai University , Tianjin 300071 , China* )

( Received 29 March 2006 ; revised manuscript received 15 August 2006 )

### Abstract

A series of microcrystalline silicon thin films solar cells were fabricated by very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition at different total gas flow rates and on different back reflectors. The results of *I-V* measurements of solar cells showed that the characteristic parameters of solar cells were all improved with the increase of total flow rate , so conversion efficiency of solar cells were increased. In addition , short circuit current ( $J_{sc}$ ) of solar cells was greatly reduced , as a result , conversion efficiency of solar cells were improved when ZnO/Ag/Al back reflector were incorporated into solar cells. The details can be seen in the paper.

**Keywords :** microcrystalline silicon thin film solar cells , total gas flow rate , ZnO/Ag/Al back reflector

**PACC :** 8630J , 8115H , 7360F

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant Nos. G2000028202 , G2000028203 ) , the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60506003 ) , the Natural Science Foundation of Tianjin , China ( Grant No. 05YFJMJC01600 ) , the International Cooperation Program of Ministry of Science and Technology , China ( Grant No. 2005197 ) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China.

<sup>†</sup> E-mail : xdzhang@nankai.edu.cn