

# 单室沉积高效非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的研究\*

张晓丹<sup>†</sup> 郑新霞 王光红 许盛之 岳 强 林 泉 魏长春

孙 建 张德坤 熊绍珍 耿新华 赵 颖

(南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室 天津, 300071)

(2009 年 12 月 29 日收到; 2010 年 2 月 2 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, 在前期单室沉积的微晶硅薄膜太阳电池和非晶硅/微晶硅叠层太阳电池研究的基础上, 通过对微晶硅底电池本征层硅烷浓度的优化, 获得了初始效率达到 11.02% (电池面积  $1.0 \text{ cm}^2$ ) 的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池. 同时,  $100 \text{ cm}^2$  的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的组件效率也达到了 9.04%.

**关键词:** 非晶硅/微晶硅叠层电池, 单室, 甚高频

**PACC:** 8115H, 7360F

## 1. 引 言

硅基薄膜太阳电池的产业化进程对光伏发电在未来整个能源领域中所占的地位具有重要影响. 现有非晶硅薄膜太阳电池已实现产业化; 考虑到进一步提高效率和降低成本, 非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的研究具有很重要的意义<sup>[1-3]</sup>. 而目前, 所制备的微晶硅薄膜太阳电池多为分室沉积, 由于需多步机械操作以及为配合产能而引入系统控制的复杂性等, 为大面积叠层电池的产业化增添了难度. 在单室中沉积不仅降低了沉积设备与产品的生产成本、设备维护成本也比较经济, 而且还可以借鉴单室制备非晶硅电池产业化的经验.

国际上, 单室沉积非晶硅/微晶硅叠层太阳电池主要集中在以下几个单位: 瑞士 IMT 研究组在 KAI System 系统中采用甚高频等离子体增强化学气相沉积 (VHF-PECVD) 技术, 制备的非晶/微晶叠层电池效率达 10.7% ( $V_{oc} = 1.335 \text{ V}$ ,  $J_{sc} = 10.98 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 73\%$ <sup>[4]</sup>); 德国 Jülich 研究所采用射频等离子体增强化学气相沉积 (RF-PECVD) 技术, 沉积的非晶/微晶叠层电池组件 ( $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ) 效率

10.7%,  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  非晶/微晶叠层电池组件效率 10.6%<sup>[5]</sup>; 美国 EPV 公司 Li 等采用 p-seeding 方法制备的非晶/微晶叠层电池经 500 h 光照稳定效率为 8.7% ( $V_{oc} = 1.39 \text{ V}$ ,  $J_{sc} = 9.54 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 66\%$ )<sup>[6]</sup>; 日本 Kaneka 公司利用所研发的适用于叠层电池的中间层 (interlayer), 将其用于非晶顶电池与微晶底电池之间, 增加了短波在顶电池中的反射, 从而增大顶电池的电流密度, 进而电池的转换效率得到了提高. 所制备的面积为  $3827 \text{ cm}^2$  非晶/微晶叠层电池效率达 13.4% (底电池微晶硅电池在单室中沉积)<sup>[7]</sup>.

以上为单室沉积的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的国际最高水平. 国内分室沉积的单结微晶硅和非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的性能已达国际先进水平<sup>[8,9]</sup>. Zhang 等在 2008 年常州的全国光伏会议上曾经报道单室沉积的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的效率达到了 10.6% ( $V_{oc} = 1.383 \text{ V}$ ,  $J_{sc} = 12.3 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 62\%$ ,  $\text{Area} = 0.253 \text{ cm}^2$ )<sup>[10]</sup>. 本文, 主要在前期研究的基础上, 通过对微晶硅底电池本征层硅烷浓度的优化, 进一步提高单室沉积的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的性能, 同时电池的面积拓展到  $1.0 \text{ cm}^2$ .

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA05Z436, 2009AA050602), 天津科技支撑项目 (批准号: 08ZCKFGX03500), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB202602, 2006CB202603), 国家自然科学基金 (批准号: 60976051), 科技部国际合作重点项目 (批准号: 2006DFA62390, 2009DFA62580) 和教育部新世纪人才 (批准号: NCET-08-0295) 资助的课题.

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

## 2. 实 验

实验中所有电池的微晶硅底电池都是在实验室超高真系统(Cluster CVD System)<sup>[9]</sup>中的一个反应室中制备. 电源激发频率为 75 MHz, 反应室本底真空在  $10^{-5}$  Pa 左右. 电池的基本结构为 glass/SnO<sub>2</sub>/a-Si: H top solar cell/ $\mu$ c-Si: H bottom solar cell/ZnO/Al 或 glass/SnO<sub>2</sub>/a-Si: H solar cell/ $\mu$ c-Si: H solar cell/Al. 蒸发的 Al 电极的面积为 1.0 cm<sup>2</sup>, 用来确定小点电池的面积. 电池的 *J-V* 测试所用光强为 AM1.5 (100 mW/cm<sup>2</sup>), 测试温度为 25℃. 电池的拉曼测试采用的激光器波长为 325 nm, 488 nm 和 632.8 nm, 以便探测样品不同深度的结构信息, 该设备为法国公司的 LabRAM HR800.

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 微晶硅底电池本征层硅烷浓度对叠层电池性能的影响

对于单室沉积非晶硅/微晶硅叠层太阳电池而言, 器件的性能很大程度上取决于微晶硅底电池的沉积, 因为单室沉积微晶硅太阳电池的污染比较难控制, 因此很难获得和分室沉积性能一致的微晶硅太阳电池, 这也包括由其组成的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池. 我们以前的文章曾经报道了高晶化率的界面层将会降低 p/i/n 型电池中 p 层沉积的硼掺

杂气所带来的对随后沉积的本征层材料特性的影响<sup>[10]</sup>. 因此, 本系列的实验研究借助于此种技术来控制硼污染的影响程度, 同时对于磷污染我们采取的相应处理技术也是固定的, 具体可参见文献[11]. 首先通过对微晶硅底电池用本征材料的优化, 我们获得了相应器件质量的本征微晶硅材料的沉积条件, 由于电池中的本征层是在微晶硅 p 层的基础上沉积的, 因此要想获得高转换效率的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池, 我们需要在电池中进行沉积参数的进一步优化.

我们在固定相应的辉光功率、衬底温度、反应气压、气体总流量等宏观参数, 只是改变硅烷浓度的比例来调控叠层太阳电池的性能. 表 1 中具体给出了我们制备的底电池不同硅烷浓度的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的性能, 电池的面积为 1.0 cm<sup>2</sup>. 关于此系列电池的具体变化规律参见图 1. 从图 1 中可以看出: 划分了两个硅烷浓度变化的范围来表明其中的变化规律. 对硅烷浓度的细微优化的研究范围内, 总的变化趋势是随着硅烷浓度的提高, 制备的叠层电池的短路电流密度是逐渐降低的; 而开路电压则呈现相应的增加, 填充因子变化规律相近. 综合上面三个性能参数的变化, 总体上电池的性能差别不大, 系列 I 是在硅烷浓度为 5% 是电池的效率最好, 而系列 II 是在硅烷浓度为 5.75% 时电池的效率为其中的最大值 10.1%. 针对上述电池性能的变化借助于不同波长的 Raman 测试结果来具体分析.

表 1 微晶硅底电池不同硅烷浓度下制备的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的性能(微晶硅底电池在单室内沉积)

	样品	条件 SC/%	面积/cm <sup>2</sup>	$J_{sc}/(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}/\text{V}$	<i>FF</i>	$\eta/\%$
系列 I	A	5	1.0	11.56	1.311	0.633	9.6
	B	5.25	1.0	11.11	1.337	0.642	9.5
	C	5.5	1.0	10.59	1.333	0.625	8.8
系列 II	D	5.75	1.0	11.60	1.352	0.644	10.1
	E	5.85	1.0	10.29	1.374	0.652	9.22

两个系列电池的 325 nm 波长的薄膜面拉曼测试结果如图 2. 从图 2 中可以看出: 所制备的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的底电池的 n 层是非晶硅, 这说明电池由 n 层引起的电流横向收集和漏电效应较小. 为了对上述系列电池的性能变化有更深入地了解, 我们进行了 632 nm 波长的拉曼测试, 结果如图 3 所示. 图 3 给出总的趋势是硅烷浓度的增加, 电

池的整体晶化率略微降低, 这就对应着电池的短路电流密度的略微降低和开路电压的略微提高. 而且从图 4 也可看出: SC = 5.75% 和 SC = 5.25% 两个硅烷浓度制备电池的晶化率几乎一样, 这是由于两个叠层电池所用的顶电池是不一样的(见图 5), 系列 I 和系列 II 的非晶硅顶电池的 n 层均是微晶 n 层, 但晶化率不同, 从而引起随后微晶硅底电池的 p 层,

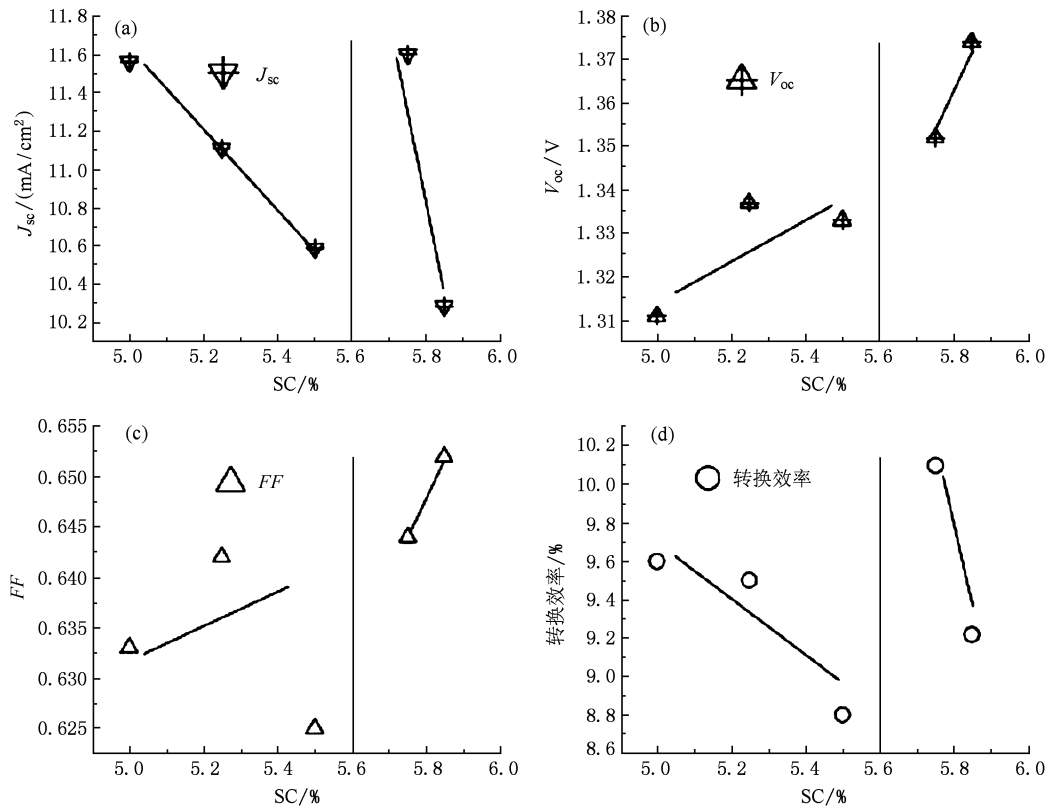


图1 微晶硅底电池不同硅烷浓度下制备的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的性能(微晶硅底电池在单室内沉积) (a) 短路电流密度  $J_{sc}$ ; (b) 开路电压  $V_{oc}$ ; (c) 填充因子  $FF$ ; (d) 转换效率

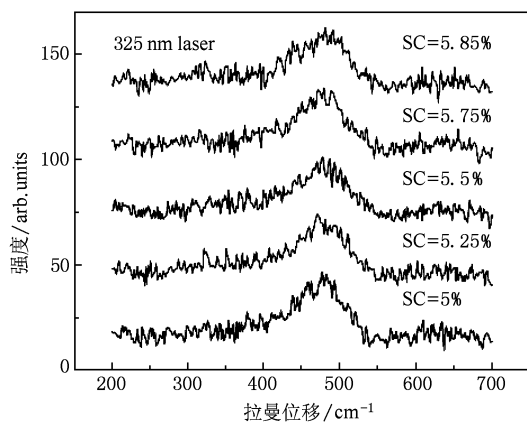


图2 非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的膜面 325 nm 波长的拉曼测试结果

以及整个微晶硅底电池的晶化率不同. 因此  $SC = 5.75\%$  由于其非晶硅顶电池的晶化率略高, 而使得该条件制备叠层电池的晶化率高, 对应的叠层电池短路电流密度也较高.

### 3.2. 非晶硅/微晶硅叠层电池的性能优化

通过前面对微晶硅底电池硅烷浓度的优化, 我

们已经获得了初始效率达到 10.1% 的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池. 为了进一步提高电池的光电转换效率, 考虑到  $ZnO$  背反射电极的加入将会在一定程度上提高所制备电池的性能<sup>[3]</sup>, 不只是短路电流密度的提高, 电池的开路电压也会有一定程度的增加, 电池的效率由此会增加 1 个百分点左右. 为此, 在前述叠层电池硅烷浓度优化的基础上, 采用  $ZnO/Al$  复合背反射电极, 获得了初始效率达到 11.02% 的单室沉积的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池, 如图 6 所示.

### 3.3. 非晶硅/微晶硅叠层太阳电池组件的优化

为了验证制备的微晶硅薄膜太阳电池的均匀性, 以及早日能够实现单室沉积微晶硅基薄膜太阳电池的产业化, 我们也进行了单室沉积的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池组件的研究, 图 7(a) 给出了制备的  $100 \text{ cm}^2$  非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的性能参数. 从图中可以看出: 电池的开路电压为 13.23 V. 平均对应着每条的开路电压为 1.323 V. 电池的短路电流密度稍微低, 原因是仅采用了  $Al$  背反射电极, 没有实现很好的陷光效果. 总之, 仅采用  $Al$  背反

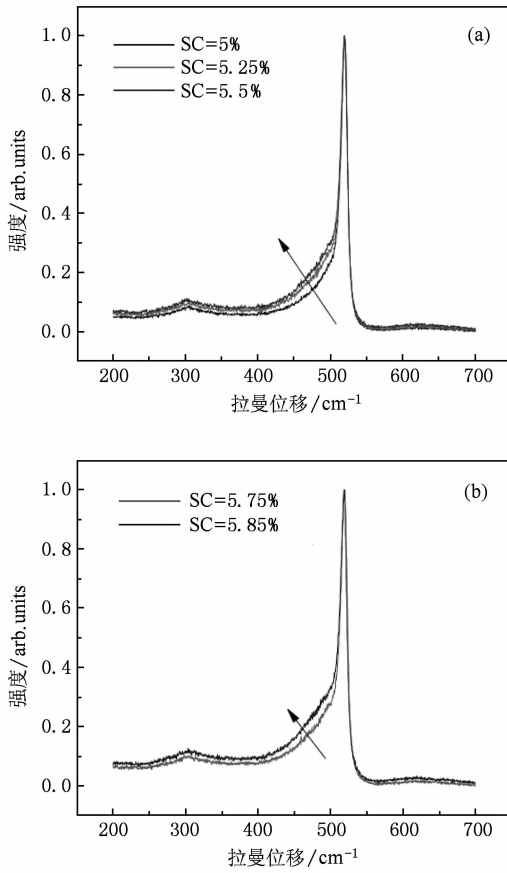


图3 非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池的膜面 632.8 nm 波长的拉曼测试结果

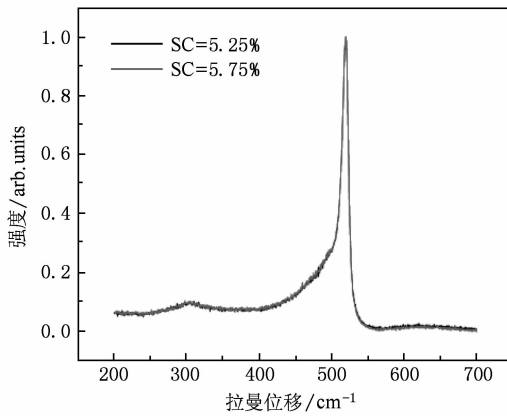


图4 非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池的膜面 632.8 nm 波长的拉曼测试结果

射电极,获得了面积为 100 cm<sup>2</sup>,初始效率为 8.28% 的非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池组件. 为了进一步提高组件的性能,也进行了 ZnO/Al 复合背反射电

极在电池中的应用研究,具体可参见图 7(b). ZnO 背反射电极的加入使得整体上组件的各个性能参数都有了一定的提高,最后获得了初始效率达到 9.04% 的 100 cm<sup>2</sup> 的单室沉积的非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池组件.

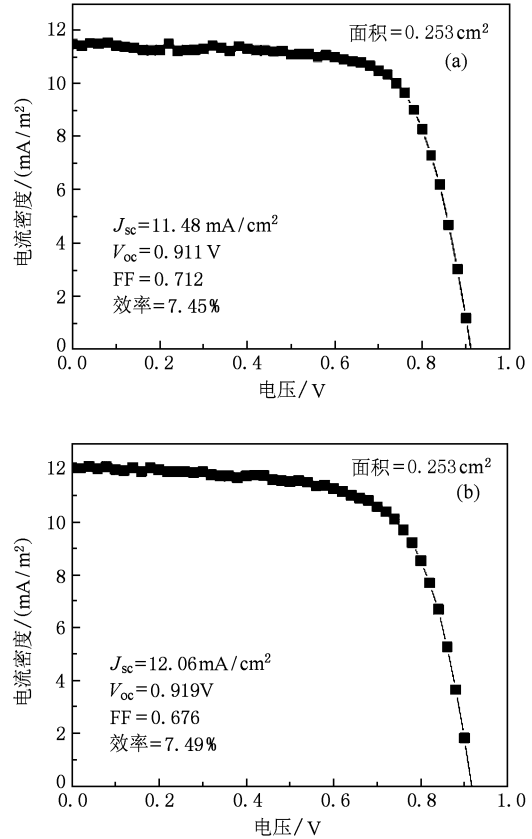


图5 非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池中的非晶硅顶电池的 J-V 特性 (a) 系列 I ; (b) 系列 II

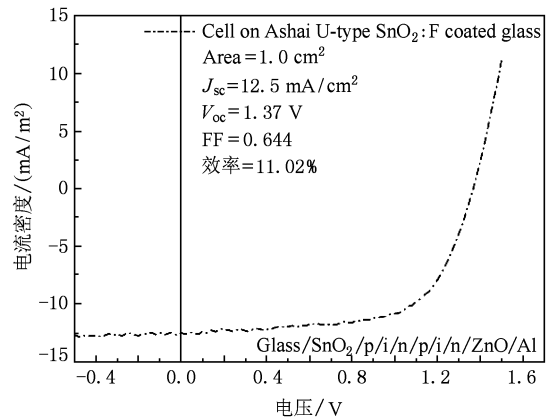


图6 单室沉积的高效非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池的 J-V 曲线图

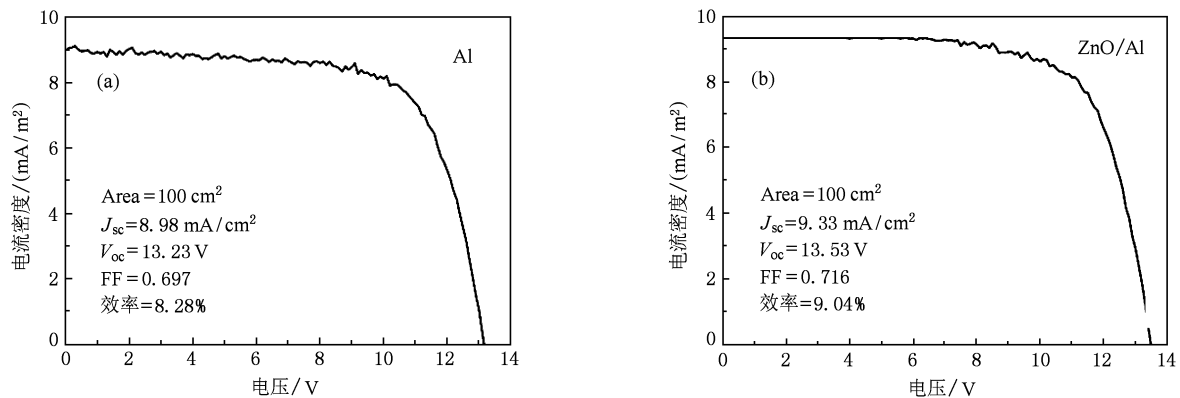


图7 单室沉积的高效非晶硅/微晶硅叠层太阳电池组件的  $I$ - $V$  曲线图 (a) Al 背反射电极; (b) ZnO/Al 背反射电极

## 4. 结 论

本文主要研究了单室沉积的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池,通过对微晶硅底电池沉积参数硅烷浓

度的优化,以及合适陷光结构的使用,获得了初始效率为 11.02% 的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池,而且  $100 \text{ cm}^2$  的非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的组件的效率也达到了 9.04%.

- [1] Yamamoto K, Nakajima A, Yoshimi M, Sawada T, Fukuda S, Suezaki T, Ichikawa M, Koi Y, Goto M, Meguro T, Matsuda T, Kondo M, Sasaki T, Tawada Y 2004 *Solar Energy* **77** 939
- [2] Shah A V, Meier J, Vallat-Sayvain E, Wyrsh N, Kroll U, Droz C, Graf U 2003 *Solar Energy and Solar Cells* **78** 469
- [3] Zhang X D, Zhao Y, Gao Y T, Zhu F, Wei C C, Chen X L, Sun J, Hou G F, Geng X H, Xiong S Z 2006 *Journal of Non-Crystalline Solids* **352** 1863
- [4] Meier J, Kroll U, Spitznagel J, Benagli S, Androustopoulos G, Monteduro G, Borello D, Hügli A, Roschek T, Zimin D, Stein W, Springer J, Kluth O, Ellert Ch, Zindel A, Büchel G, Büchel A, Koch D, Feitknecht L, Bucher C, Freitas F 2006 *Conference Record of the 2006 IEEE 4th Conference on Photovoltaic Energy Conversion Volume 2* 1720
- [5] Repmann T, Appenzeller W, Sehrbrock B, Stiebig H, Rech B 2004 *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference* 1334
- [6] Li Yuan-Min, Anna Selvan J A, Foustotchenko A, Li Liwei, Delahoy A E 2005 *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Thirty-first IEEE* **1** 1420
- [7] Yamamoto K, Nakajima A, Yoshimi M, Sawada T, Fukuda S, Suezaki T, Ichikawa M, Koi Y, Goto M, Meguro T, Matsuda T, Sasaki T, Tawada Y 2006 *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference* **2** 1489
- [8] Zhang X D, Zhao Y, Gao Y T, Chen F, Zhu F, Wei C C, Sun J, Geng X H, Xiong S Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6697 (in Chinese) [张晓丹、赵颖、高艳涛、陈飞、朱锋、魏长春、孙建、耿新华、熊绍珍 2006 物理学报 **55** 6697]
- [9] Zhao Y, Zhang X D, Zhu F, Gao Y T, Wei C C, Xue J M, Ren H Z, Zhang D K, Hou G F, Sun J, Geng X H 2005 *15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-15)* Shanghai China 65-67
- [10] Zhang X D, Sun F H, Wang G H, Xu S Z, Wei C C, Hou G F, Sun J, Xiong S Z, Geng X H, Zhao Y 2009 *23rd ICANS, Utrecht Netherland*, ID 53
- [11] Wang G H, Zhang X D, Xu S Z, Wei C C, Sun J, Xiong S Z, Geng X H, Zhao Y 2009 *23rd ICANS, Utrecht Netherland*, ID 503

## High efficiency amorphous/microcrystalline silicon tandem solar cells deposited in a single chamber system\*

Zhang Xiao-Dan<sup>†</sup> Zheng Xin-Xia Wang Guang-Hong Xu Sheng-Zhi Yue Qiang Lin Quan  
Wei Chang-Chun Sun Jian Zhang De-Kun Xiong Shao-Zhen Geng Xin-Hua Zhao Ying  
(*Institute of Photo-electronic Thin Film Devices and Technology of Nankai University, Key Laboratory of Photo-Electronic  
Thin Film Devices and Technology of Tianjin, Tianjin 300071, China*)

(Received 29 December 2009; revised manuscript received 2 February 2010)

### Abstract

Based on the previous research on the deposition of amorphous/microcrystalline (micromorph) silicon tandem solar cells, silane concentration for the deposition of microcrystalline bottom cell is selected to further optimize the performance for micromorph tandem solar cells by using very high frequency technique. Finally, micromorph silicon tandem solar cell with 11.02% (Area = 1.0cm<sup>2</sup>) initial conversion efficiency is fabricated at a certain silane concentration, and it has a structure suitable for trapping light. Furthermore, 100cm<sup>2</sup> micromorph module with 9.04% initial conversion efficiency is also successfully obtained.

**Keywords:** amorphous/microcrystalline silicon tandem solar cells, single chamber, very high frequency

**PACC:** 8115H, 7360F

---

\* Project supported by Hi-Tech Research and Development Program of China (Grant Nos. 2007AA05Z436, 2009AA050602), Science and Technology Support Project of Tianjin, China (Grant No. 08ZCKFGX03500), the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2006CB202602, 2006CB202603), the National Natural Science Foundation of China, China (Grant No. 60976051), the International Cooperation Project between China-Greece Government, China (Grant Nos. 2006DFA62390, 2009DFA62580), and the Program for New Century Excellent Talents in University of China (NCET-08-0295).

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