

提高非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池光稳定性的研究*

侯国付[†] 卢鹏 韩晓艳 李贵君 魏长春 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,

光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2011年10月18日收到; 2011年12月7日收到修改稿)

如何提高硅基薄膜太阳能电池的光稳定性是硅基薄膜太阳能电池研究和产业化过程中非常重要的问题. 为了提高非晶硅/微晶硅叠层电池的光稳定性, 本文首先给出了良好光稳定性非晶硅顶电池的结果, 然后重点研究了 N/P 隧穿结和微晶硅底电池本征层硅烷浓度梯度对叠层电池光稳定性的影响. 经过初步优化, 连续光照 1000 h 后非晶硅/微晶硅叠层电池的最小光致衰退率只有 7%.

关键词: 光致稳定性, 非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池, 硅烷浓度梯度, 隧穿结

PACS: 84.60.Jt, 85.40.Sz, 68.55.-a, 73.61.Jc

1 引言

在实际使用过程中, 太阳能电池需要经历春夏秋冬、刮风下雨、高/低温、高湿度等剧烈极端条件的考验. 在这种环境下其稳定性如何是关系到太阳能电池最终能否实际应用的关键因素^[1-5].

对于非晶硅电池而言, 造成其性能衰退的最主要因素是非晶硅的 S-W 效应^[1], 而电池界面和组件后封装也可能造成一定的衰退. 对于微晶硅而言, 其结构比较复杂, 既有非晶组分、微晶粒组分构成的混合相材料, 又伴有空洞、晶界等结构缺陷. 不难想象, 这样的材料及其相应太阳能电池的衰退现象将非常复杂^[2,3]. 由于单结非晶硅或者微晶硅电池的效率较低, 最常用的还是两者结合构成两结或者三结叠层电池^[4]. 因此, 无论非晶硅顶电池或者微晶硅底电池各自的稳定性如何, 最根本的还是叠层电池本身的稳定性.

非晶硅/微晶硅叠层电池的光稳定性即与非晶硅顶电池有关, 又与微晶硅底电池有关, 此外还受到叠层电池结构设计的影响. 本文首先给出了良好光稳定性非晶硅顶电池的结果^[5], 然后重点研究微晶硅底电池以及 N/P 隧穿结对非晶硅/微晶硅叠层电池光稳定性的影响.

2 实验过程和条件

本文中的非晶硅顶电池是在七室连续 PECVD 系统中采用 13.56 MHz RF 技术沉积, 微晶硅底电池是在 Cluster PECVD 系统中采用 70 MHz VHF 技术沉积. 非晶硅/微晶硅叠层电池的结构为: glass/SnO₂/p-a-SiC: H/i-a-Si: H/n-Si: H/p- μ c-Si: H/i- μ c-Si: H/n-a-Si: H/(ZnO)/Al.

为了获得更加准确的太阳能电池不同时间段的衰退过程, 采用吉时利公司的 7001 多路开关与 2420 数字源表结合, 以 TestPoint V6.0 为平台编写虚拟控制程序, 设计了一套太阳能电池光衰退自动化测试系统, 可避免人为测试过程中产生误差, 且能够按照预先设计好的测试时间段, 对太阳能电池实行周期性取样, 记录电池相关性能参数 (如电池的短路电流密度 J_{SC} 、开路电压 V_{OC} 、填充因子 FF 及光电转化效率 Eff.) 的衰退情况.

光照实验采用额定功率为 3 kW 的长弧氙灯作为模拟太阳光源, 采用标准电池标定光照强度 100 mW/cm². 在光照实验的过程中, 利用循环冷却水、散热风机等控温设备对光照实验台的温度进行控制, 使电池的温度保持在 50 \pm 5 $^{\circ}$ C 在上述

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CBA00705, 2011CBA00706, 2011CBA00707)、国家高技术研究发展规划 (批准号: 20011AA050503)、国家自然科学基金 (批准号: 61176060)、天津市自然科学基金重点项目 (批准号: 12JCZDJC28300) 和江苏省微纳生物医疗器械设计与制造重点实验室开放基金 (批准号: JSNB1201001) 资助的课题.

[†] E-mail: guofu.hou@yahoo.com.cn

条件下对太阳电池连续光照老化 1000 h 即相当于室外寿命 20 年.

3 实验结果与讨论

3.1 降低硅烷浓度提高非晶硅顶电池稳定性的研究

硅烷浓度对于非晶硅电池的光致稳定性有非常大的影响. 通过降低本征非晶硅的硅烷浓度, 使之沉积在非晶硅/微晶硅相变域靠近非晶硅的一侧, 能够显著提高相应电池的稳定性 [3,5,6]. 实验中保持非晶硅电池的 p 型和 n 型掺杂沉积条件不变, 改变本征非晶硅的硅烷浓度制备了一系列电池, 然后进行光老化实验. 结果表明, 当硅烷浓度为 6% 时, 电池的稳定性最好, 1000 小时后的光致衰退率仅为 6.02%, 比传统硅烷浓度 20% 时制备的电池稳定性大大提高, 如表 1 所示.

3.2 N/P 隧穿结对非晶/微晶硅叠层电池稳定性的影响

在非晶硅/微晶硅叠层电池 N/P 隧穿结中, 微

晶硅底电池的窗口层采用 p- $\mu\text{c-Si:H}$, 而非晶硅顶电池采用双 N 层结构, 即 N 层包括一定厚度的非晶硅 N 层和一定厚度的微晶硅 N 层. 我们以前的研究表明, 这种双 N 层能够有效地减小顶电池的漏电现象, 进而提高电池的开路电压和填充因子 [7]. 本文进一步研究了双 N 层结构对叠层电池光照稳定性的影响. 将不同 N 层的叠层电池进行了 1000 h 的光照老化实验, 电池 J_{sc} , V_{oc} , FF 和 Eff. 的归一化衰退曲线如图 1 所示. 可以看出, 所有电池的 J_{sc} 在光照开始的很短时间内迅速降低, 之后基本上没有变化, 总体的衰退率都在 2% 以内; V_{oc} 在光照过程中没有显著变化, 衰退率在 1% 以内; FF 衰退非常明显, 在光照开始的 200 h 之内迅速降低, 之后逐渐趋于平稳; 上述参数的变化最终导致电池的效率先是在 200 h 内迅速减低, 之后变化相对较小.

表 1 不同硅烷浓度非晶硅顶电池光照 1000 h 后的衰退率

SC of i-layer	ΔV_{oc}	ΔJ_{sc}	ΔFF	$\Delta \text{Eff.}$
6%	1.45%	-2.53%	-5.06%	-6.02%
20%	-3.23%	-3.50%	-13.02%	-18.63%

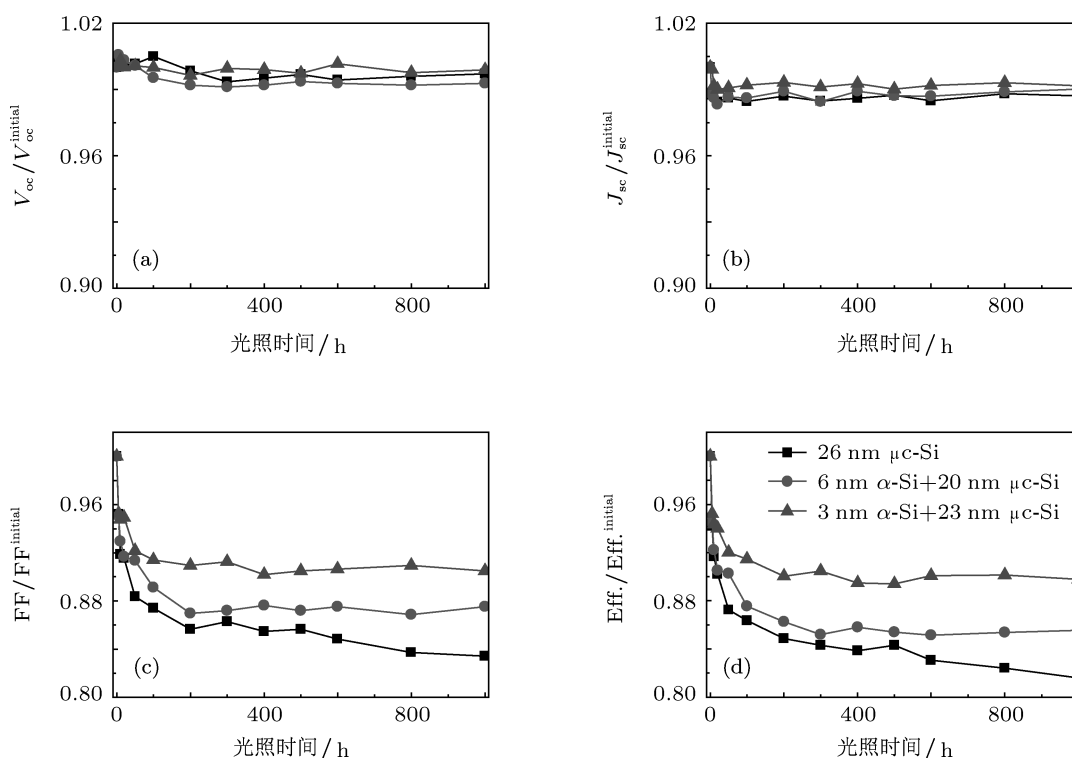


图 1 具有不同 N/P 隧穿结的非晶硅/微晶硅叠层电池性能随光老化时间的变化

表 2 具有不同 n/p 隧穿结的 a-Si/ μ c-Si 叠层电池初始、1000 h 光老化和退火后性能参数

n-layer		V_{oc}/V	$J_{sc}/\text{mA}/\text{cm}^2$	FF	Eff./%
26 nm μ c-Si	初始结果	1.232	10.304	0.627	7.965
	1000 h 老化结果	1.216	10.171	0.523	6.5
		(-1.3%)	(-1.29%)	(-16.59%)	(-18.39%)
	退火结果	1.261	10.519	0.579	7.676
		(+2.35%)	(+2.09%)	(-7.666%)	(-3.63%)
	6 nm a-Si + 20 nm μ c-Si	初始结果	1.246	10.586	0.625
1000 h 老化结果		1.242	10.481	0.547	7.13
		(-0.32)	(-0.99%)	(-12.48%)	(-14.44%)
退火结果		1.25	10.656	0.595	7.924
		(+0.32%)	(+0.66%)	(-4.8%)	(-3.8%)
3 nm a-Si+ 23 nm μ c-Si		初始结果	1.236	9.582	0.652
	1000 h 老化结果	1.235	9.502	0.59	6.93
		(-0.08%)	(-0.83%)	(-9.51%)	(-10.22%)
	退火结果	1.232	9.77	0.603	7.257
		(+0.32%)	(+1.96%)	(-7.52%)	(-5.99%)

非晶硅/微晶硅叠层电池的初始性能、光老化 1000 h 和在 150 °C 下经过 1 h 退火后的性能参数如表 2 所示. 采用单层微晶硅 N 层时, 电池总的衰退率是 18.39%, 而采用双 N 层后叠层电池稳定性明显得到改善. 电池的 J_{sc} 和 V_{oc} 都能够恢复甚至超过初始值, 而 FF 只能够大部分的恢复. 当双 N 层中的非晶硅厚度为 3 nm 时, 叠层电池的稳定性最好, 而非晶硅厚度为 6 nm 时, 叠层电池的稳定性反而变差. 一定厚度的非晶硅 N 层能够起到阻挡层的作用, 从而有效地减小顶电池的漏电现象; 而当非晶硅 N 层厚度超过一定值时, 则会增大叠层电池的串联电阻, 反而不利于电池的初始效率和光致稳定性. 叠层电池的衰退中能够退火恢复的部分来自于非晶硅顶电池和微晶硅底电池中的非晶硅组份; 而不可恢复的衰退一部分来自于微晶硅底电池本征层中晶粒边界不可逆的光致缺陷 [3], 而另一部分则来自于电池的各个界面, 其中采用双 N 层的 N/P 隧穿结能够提高叠层电池稳定性就是一个很好的例证.

3.3 微晶硅本征层硅烷浓度梯度对非晶硅/微晶硅叠层电池稳定性的影响

硅烷浓度梯度能够明显改善微晶硅的纵向结构演化, 从而提高单结微晶硅电池的初始效率 [8]. 这里我们也采用硅烷浓度梯度方法沉积微晶硅底电池的本征层, 并研究不同硅烷浓度梯度对非

晶硅/微晶硅叠层电池光稳定性的影响. 实验采用四步和五步硅烷浓度梯度方法, 微晶硅本征层厚度 $\sim 2.5 \mu\text{m}$, 基本沉积过程如图 2 所示. 叠层电池经过 1000 h 光老化, 其各性能参数归一化衰退率随光老化时间的变化如图 3 所示. 各个参数的衰退基本上都发生在前 200 h 之内, 之后基本不再变化, 趋于饱和. 采用五步硅烷浓度梯度方法制备微晶硅本征层对应叠层电池的 V_{oc} 和 J_{sc} 衰退率都小于采用四步硅烷浓度梯度时电池的 V_{oc} 和 J_{sc} 衰退率, 而 FF 的衰退两者相差不大.

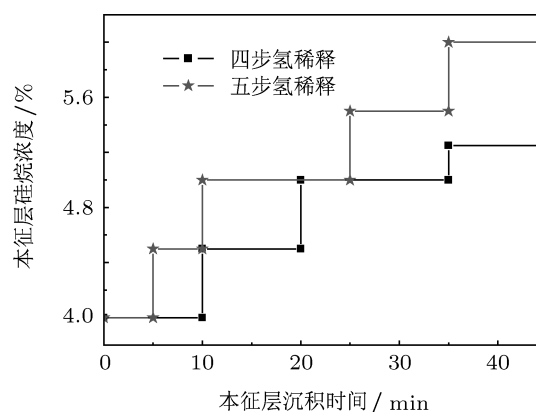


图 2 不同微晶硅本征层硅烷浓度梯度变化

非晶硅/微晶硅叠层电池的初始性能、光老化 1000 h 和在 150 °C 下经过 1 h 退火后的性能参数如表 3 所示. 可以看出, 五步硅烷浓度既能够提高叠层电池的初始性能, 也能够提高其稳定性. 叠

层电池的 J_{sc} 和 V_{oc} 都能够基本恢复甚至超过初始值, 而 FF 只能够部分恢复. 退火后不可恢复的衰退很小 ($< 3\%$), 这证明多步硅烷浓度梯度能够减小微晶硅本征层的纵向结构演化, 晶粒边界得到很好的

钝化, 从而即能够减小初始缺陷态密度, 也能够抑制光致缺陷的产生 [9]. 经过初步的优化, 非晶硅/微晶硅叠层电池的最小光致衰退率可达 7%.

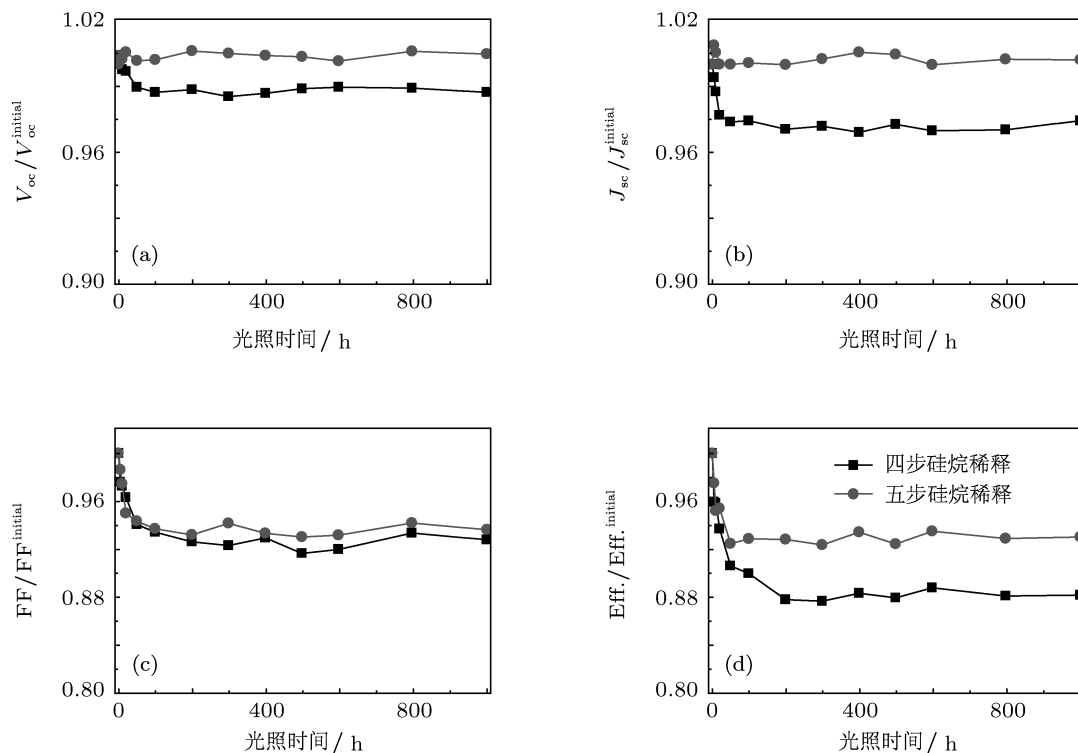


图 3 含有不同微晶硅本征层硅烷浓度梯度的非晶硅/微晶硅叠层电池性能随光老化时间的变化

表 3 微晶硅底电池本征层采用四步和五步硅烷浓度梯度时 a-Si/μc-Si 叠层电池初始、1000 h 光老化和退火后性能参数

		V_{oc}/V	$J_{sc}/\text{mA}/\text{cm}^2$	FF	Eff./%
四步 硅烷浓度	初始结果	1.254	12.005	0.624	9.398
	1000 h 老化结果	1.235	11.698	0.579	8.381
		(-1.276%)	(-2.557%)	(-7.212%)	(-10.82%)
	退火结果	1.254	11.885	0.612	9.121
		0	(-1%)	(-1.923%)	(-2.95%)
五步 硅烷浓度	初始结果	1.271	11.56	0.66	9.695
	1000 h 老化结果	1.277	11.438	0.618	9.018
		(+0.472%)	(-1.055%)	(-6.364%)	(-6.97%)
	退火结果	1.282	11.744	0.633	9.531
		(+0.866%)	(+1.59%)	(-4.09%)	(-1.69%)

4 结论

本文主要对如何提高非晶硅/微晶硅叠层电池光稳定性进行了研究, 可得到以下结论: 沉积在非晶硅/微晶硅相变域的非晶硅顶电池具有良好的光

致稳定性; 采用合理设计的非晶硅顶电池的双 N 层和氢稀释率梯度法沉积微晶硅底电池本征层既能够提高叠层电池初始性能, 也能够提高稳定性. 经过初步优化, 非晶硅/微晶硅叠层电池的最小光致衰退率只有 7%.

- [1] Staebler D L, Wronski C R 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 292
- [2] Finger F, Carius R, Dylla T, Klein S, Okur S, Günes M 2005 *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* **7** 83
- [3] Wang Y 2007 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [王岩 2007 博士学位论文 (天津: 南开大学)]
- [4] Yan B J, Yue G Z, Yang J, Banerjee A, Guha S 2003 *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **762** A4.1.1
- [5] Xue J M, Ren H Z, Sun J, Guo Q C, Wang Y, Zhang D K, Han X Y, Hou G F, Geng X H 2005 *Proceedings of the 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference* (PVSEC-15) Shanghai China, Oct 11–14, 2005 p646
- [6] Wang Y, Han X Y, Ren H Z, Hou G F, Guo Q C, Zhu F, Zhang D K, Sun J, Xue J M, Zhao Y, Geng X H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 947 (in Chinese) 王岩, 韩晓艳, 任慧志, 侯国付, 郭群超, 朱锋, 张德坤, 孙建, 薛俊明, 赵颖, 耿新华 2006 物理学报 **55** 947
- [7] Li G J, Hou G F, Han X Y, Yuan Y J, Wei C C, Sun J, Zhao Y, Geng X H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1674
- [8] Yan B J, Yue G Z, Yang J, Gu H S, Williamson D L, Han D X, Jiang C S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1955
- [9] Yue Guo Z, Yan B J, Ganguly G, Yang J, Gu H S, Teplin C W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 263507

Improving the light-soaking stability of a-Si: H/ μ c-Si: H tandem solar cells*

Hou Guo-Fu[†] Lu Peng Han Xiao-Yan Li Gui-Jun
Wei Chang-Chun Geng Xin-Hua Zhao Ying

(Institute of Photo-electronics Thin Film Devices and Technique of Nankai University, Key Laboratory of Photo-electronics Thin Film Devices and Technique of Tianjin, Key Laboratory of Photo-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education (Nankai University), Tianjin 300071, China)

(Received 18 October 2011; revised manuscript received 7 December 2011)

Abstract

Improving the light-soaking stability of silicon-based thin film solar cells is a very important issue for industrial production. In order to obtain high-efficiency a-Si:H/ μ c-Si:H tandem solar cells with good light-soaking stability, In this paper we first present the results about a-Si:H top solar cell with high light-soaking stability. Then we mainly investigate the influences of N/P tunnel junction and silane concentration (SC) profiling of μ c-Si:H i-layer on the light-soaking stability of a-Si:H/ μ c-Si:H tandem solar cells. Up to now we have been able to obtain a-Si:H/ μ c-Si:H tandem solar cell with a light-soaking degradation ratio of only 7%.

Keywords: light-soaking stability, a-Si:H/ μ c-Si:H tandem solar cell, silane concentration profiling, N/P tunnel junction

PACS: 84.60.Jt, 85.40.Sz, 68.55.–a, 73.61.Jc

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CBA00705, 2011CBA00706, 2011CBA00707), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 20011AA050503), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61176060), the Key Project of Natural Science Foundation of Tianjin (Grant No. 12JCZDJC28300), and the Open Project of Jiangsu Key Laboratory for Design and Manufacture of Mico-Nano Biomedicak Instruments (Grant No. JSNBI201001).

[†] E-mail: guofu.hou@yahoo.com.cn