

非晶硅顶电池中的 n 型掺杂层对非晶硅/微晶硅叠层 太阳能电池性能的影响*

韩晓艳[†] 李贵君 侯国付 张晓丹 张德坤 陈新亮 魏长春 孙健
薛俊明 张建军 赵颖 耿新华

(南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室,
光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室, 天津 300071)

摘要: 采用超高频等离子增强化学气相沉积(VHF-PECVD)技术, 逐次高速沉积非晶硅顶电池及微晶硅底电池, 形成 pin/pin 型非晶硅/微晶硅叠层电池. 通常顶电池的 n 层与底电池的 p 层均采用微晶硅材料来形成隧穿复合结, 然而该叠层电池的光谱响应测试结果表明, 顶电池存在着明显的漏电现象. 针对该问题作者提出, 在顶电池的微晶硅 n 层中引入非晶硅 n 保护层的方法. 实验结果表明, 非晶硅 n 层的引入有效地改善了顶电池漏电的现象; 在非晶硅 n 层的厚度为 6nm 时, 顶电池的漏电现象消失, 叠层电池的开路电压由原来的 1.27 提高到 1.33V, 填充因子由 60% 提高到 63%.

关键词: 超高频等离子增强化学气相沉积技术; 非晶硅/微晶硅叠层电池; n/p 隧穿结

PACC: 8115H; 8630J; 7360F

中图分类号: TN304.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)08-1548-04

1 引言

在光伏电池领域, 硅基薄膜太阳能电池因其原材料储量丰富、无污染、制备工艺简单、便于大面积连续化生产等优点, 受到国内外专家的广泛关注. 非晶硅和微晶硅具有不同带隙(分别为~1.7 和 1.2eV), 以非晶硅为顶电池, 微晶硅为底电池, 构成的非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池, 可以将电池光谱响应长波限从目前非晶硅/非晶硅锗/非晶硅锗三结太阳能电池的 0.9 扩展到 1.1 μm , 提高太阳光谱利用率^[1]; 并且叠层电池的非晶硅子电池的本征吸收层较原来的单结电池的吸收层薄, 可以抑制 SW 效应的作用, 大大提高电池的稳定性. 因此, 薄膜非晶硅/微晶硅叠层电池, 是目前国内外研究的热点方向^[2,3].

叠层电池中的 n/p 隧穿复合结(tunnel recombination junction, TRJ)是影响电池性能的一个关键因素, 作为隧穿复合结的 n/p 结应具有欧姆接触特性和较好的隧穿特性, 根据这样的要求通常该结处的 n 层和 p 层均采用微晶硅材料^[4,5]. 然而对这样的电池光谱分析发现, 顶电池存在着明显的漏电现象. 作者对顶电池的漏电现象进行了分析, 并提出了较好的解决方案.

2 实验

非晶硅顶电池和微晶硅底电池均在本研究所自组

装的 Cluster-PECVD 沉积系统中制备得到, 其中电池中的 p 层采用 60MHz 的激发频率, n 层采用 13.56MHz 的激发频率, 而 i 层采用 70MHz 的激发频率, 且顶电池和底电池中的本征层(i 层)的沉积速率均为 1nm/s 左右, 通过优化顶底电池的电流匹配, 顶电池和底电池 i 层的沉积时间分别为 5 和 45min. 叠层电池的结构及各层厚度见图 1, 其中电池面积为 0.25cm².

电池的 J-V 特性是在 AM1.5, 100mW/cm², 室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下测试得到的.

太阳能电池的量子效率(QE)定义为光照在电池上, 电池内部产生的对短路电流有贡献的载流子数与入射到电池表面光子数的比值, 如(1)式, 它用来表征微晶硅

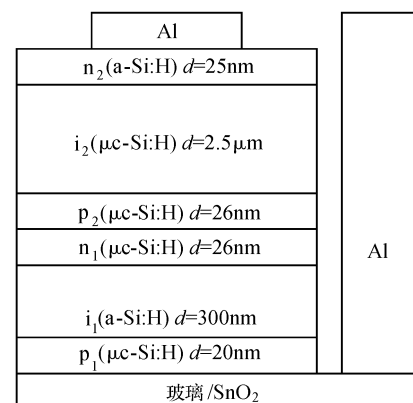


图 1 非晶硅/微晶硅叠层电池的结构示意图
Fig.1 Scheme of a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ tandem solar cell

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB202602, 2006CB202603), 国家自然科学基金(批准号:60506003)和国家科技计划配套基金(批准号:07QTPTJC29500)资助项目

[†] 通信作者. Email: hxy2006@mail.nankai.edu.cn

2008-01-31 收到, 2008-03-25 定稿

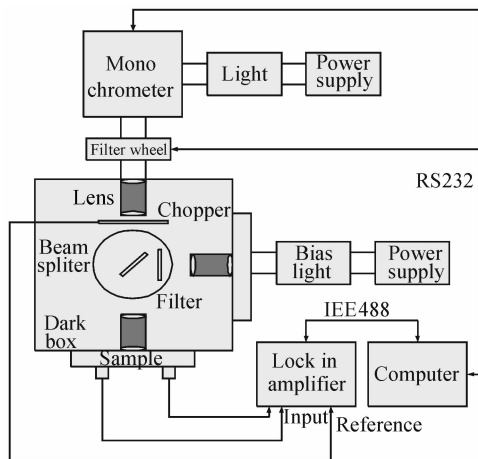


图 2 叠层电池 QE 的测试原理图

Fig.2 Testing principle diagram of quantum efficiency of the solar cell

电池的光谱响应. 根据标准 AM1.5 数据对 QE 结果进行积分可以推算电池的短路电流密度 J_{sc} , 如(2)式, 计算得到的 J_{sc} 与标准光源下测得的 J_{sc} 允许有 10% 的偏差.

$$QE(\lambda) = \frac{N_c}{N_{ph}} = \frac{j_{ph}(\lambda)}{e\Phi(\lambda)} \quad (1)$$

$$j_{sc} = e \int QE(\lambda)\Phi(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

QE 测试的原理及仪器连接如图 2 所示. 测量时对电池加红色偏光(红光主要被微晶硅底电池吸收)使底电池短路, 从而测试得到顶电池的 QE; 加蓝色偏光(蓝光主要被非晶顶电池吸收)使顶电池短路, 从而测试得到底电池的 QE; 而不加偏光时(通常被称为暗态 QE), 正常的情况下测试得到的 QE 应为顶电池与底电池 QE 的重叠部分(即在 $\lambda < \lambda_c$ 时, 其中 λ_c 为顶底电池 QE 曲线的交点, 暗态 QE 曲线应与底电池的 QE 曲线重合; 而 $\lambda > \lambda_c$ 时, 暗态曲线应与顶电池的 QE 曲线重合), 通常暗态 QE 曲线呈现为三角形.

3 结果与讨论

非晶硅顶电池的 n 型掺杂层通常采用微晶硅材料, 而这样得到的叠层电池的开路电压 (V_{oc}) 较小, 为了分析原因, 对该电池进行了光谱响应(量子效率)的测量, 结果见图 3, 其中 red, blue, dark 分别为加红色偏光、蓝色偏光及不加偏光时测得的 QE 曲线. 由图 3 可知, 该电池的暗态光谱响应并不是正常的三角形形状, 而是和底电池的 QE 曲线相近, 这说明在顶电池中存在着漏电分路.

容易造成非晶硅顶电池漏电的一个重要因素, 可能就是微晶 n 层中存在漏电沟道, 因此设计提出了在 i_1 (a-Si:H) / n_1 (μ c-Si:H) 之间加入非晶 n 层的方法来防止漏电. 加入非晶 n 层后电池的结构示意图如图 4.

在顶电池和底电池其他条件都不变的情况下, 在 i_1 (a-Si:H) / n_1 (μ c-Si:H) 之间加入不同厚度的非晶硅 n

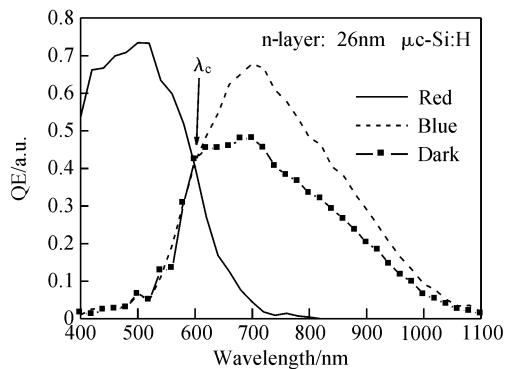


图 3 非晶硅/微晶硅叠层电池中采用微晶硅 n 层与微晶硅 p 层形成隧穿结时的量子效率曲线

Fig.3 Quantum efficiency of an a-Si:H / μ c-Si:H pin/pin tandem cell with μ c-Si:H n-layer and μ c-Si:H p-layer in the TRJ

层得到的叠层电池 QE 结果见图 5. 可以看到与图 3 相比, 加入 3nm 非晶硅 n 层的叠层电池暗态 QE 曲线变形的程度得到了较大改善, 而加入 6nm 的非晶硅 n 层时暗态 QE 曲线变形情况完全消失, 这说明叠层电池中的顶电池不存在漏电分路.

采用单层微晶 n 层与加入 6nm 的非晶 n 层的叠层电池的 $J-V$ 曲线见图 6. 由图 6 可知, 在顶电池的 i(a-Si:H) / n(μ c-Si:H) 中加入 6nm 的非晶 n 层后, 叠层电池的各项参数都有所提高, 其中开路电压 V_{oc} 由原来的 1.27 提高到 1.33V, 填充因子 FF 由原来的 60% 提高到 63%, 而这两个电池只是采用了不同的顶电池 n 型掺杂层, 那么电池性能改善的主要原因, 可能是非晶 n 层的引入, 使顶电池漏电现象消失引起的. 为了验证这一点, 对这两个电池进行了红光 $J-V$ 的测试.

通过红光滤光片测试的 $J-V$ 结果见图 7. 在红光滤光片下测得的 $J-V$ 特性中填充因子的信息主要来自于顶电池, 比较两个电池结果得知, 加入非晶 n 层的顶电池填充因子提高了, 这与叠层电池的结果一致, 即在顶电池中引入非晶 n 保护层使顶电池不存在漏电沟道, 提高了顶电池的 V_{oc} 和 FF, 从而提高了叠层电池的 V_{oc} 和 FF.

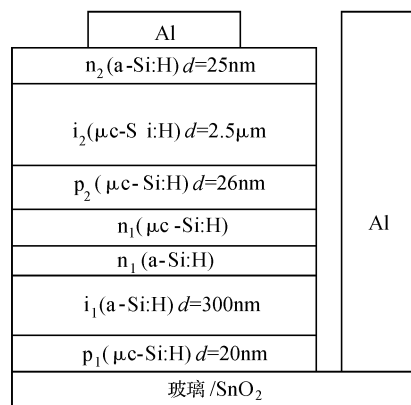


图 4 加入非晶 n 层后电池的结构示意图

Fig.4 Scheme of a-Si:H / μ c-Si:H tandem solar cell after inserting a-Si:H n-layer

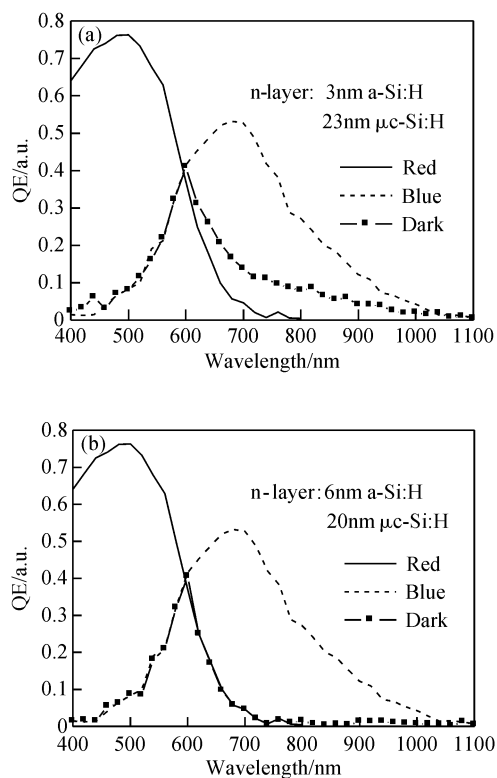


图 5 在 i(a-Si:H)/n(μ c-Si:H)之间加入不同厚度的非晶 n 层得到的叠层电池 QE 曲线 (a)隧穿结采用 3nm 的非晶硅 n 层和 23nm 的微晶硅 n 层;(b)隧穿结采用 6nm 的非晶硅 n 层和 20nm 的微晶硅 n 层

Fig.5 Quantum efficiency of an a-Si/ μ c-Si tandem cell with 3nm a-Si:H n-layer and 23nm μ c-Si:H n-layer in the TRJ (a) and 6nm a-Si:H n-layer and 20nm μ c-Si:H n-layer in the TRJ (b)

4 结论

对一般的非晶硅/微晶硅叠层电池进行光谱响应测试发现,叠层电池中的顶电池存在漏电现象.针对该问题,作者提出在非晶硅顶电池的 i(a-Si:H)/n(μ c-Si:H)中引入非晶 n 保护层的方法.实验结果表明,非晶 n 层

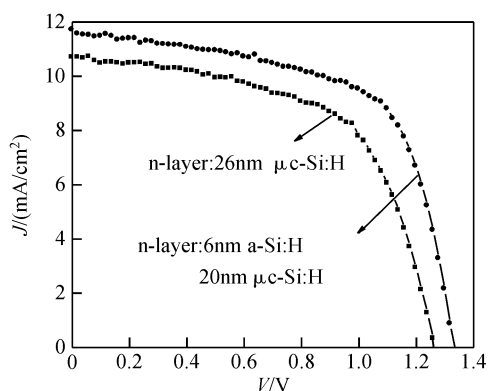


图 6 顶电池采用不同 n 型掺杂层的电池 J-V 曲线

Fig.6 J-V curves of tandem solar cells with different n layers

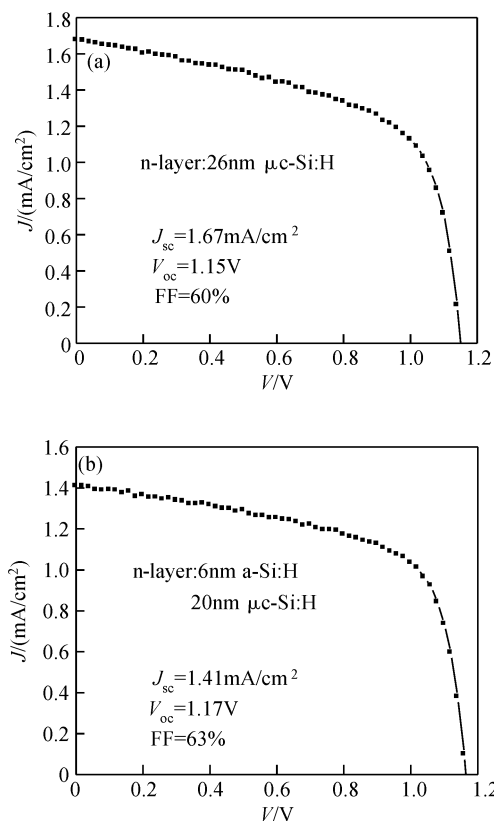


图 7 通过红色滤光片测得的非晶硅/微晶硅叠层电池的 J-V 特性曲线 (a)隧穿结采用 26nm 微晶硅 n 层;(b)隧穿结采用 6nm 非晶硅 n 层和 20nm 微晶硅 n 层

Fig.7 J-V curve of an a-Si/ μ c-Si tandem cell with 26nm μ c-Si:H n-layer in the TRJ (a) and 6nm a-Si:H n-layer and 20nm μ c-Si:H n-layer in the TRJ (b)

的引入有效地降低了顶电池漏电现象,并在非晶 n 层厚度为 6nm 时,顶电池漏电现象消失,而该叠层电池的开路电压和填充因子都有不同程度的提高.

上述结果表明,暗态 QE 曲线偏离正常的三角形会使叠层电池性能降低;而对于消除顶电池漏电的有效方法是在 i(a-Si:H)/n(μ c-Si:H)中引入非晶 n 保护层.

参考文献

- [1] Bergmann R B, Werner J H. The future of crystalline silicon films on foreign substrates. *Thin Solid Films*, 2002, 403/404: 162
- [2] Meier J, Dubail S, Fluckiger R, et al. Intrinsic microcrystalline silicon (μ c-Si:H)— a promising new thin film solar cell material. *Proc 1st WCPEC, Hawaii*, 1994: 409
- [3] Meier J, Dubail S, Cuperus J, et al. Recent progress in micromorph solar cells. *J Non-Cryst Solids*, 1998, 227~230: 1250
- [4] Xue Junming, Mai Yaohua, Zhao Ying, et al. Investigation on a-Si/ μ c-Si tandem solar cell. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2005, 26(2): 166 (in chinese) [薛俊明, 麦耀华, 赵颖, 等. 薄膜非晶硅/微晶硅叠层太阳电池的研究. *太阳能学报*, 2005, 26(2): 166]
- [5] Löffler J, Gordijn A, Stolk R L, et al. Amorphous and 'micromorph' silicon tandem cells with high open-circuit voltage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2005, 87: 251

Effect of n Doped Layers in an Amorphous Silicon Top Solar Cell on the Performance of “Micromorph” Tandem Solar Cells*

Han Xiaoyan[†], Li Guijun, Hou Guofu, Zhang Xiaodan, Zhang Dekun, Chen Xinliang,
Wei Changchun, Sun Jian, Xue Junming, Zhang Jianjun,
Zhao Ying, and Geng Xinhua

(*Key Laboratory of Photoelectronics Thin Film Devices and Technique of Tianjin, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology of the Ministry of Education, Institute of Photoelectronics Thin Film Devices and Technique, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract: Pin/pin “micromorph” tandem solar cells were deposited by very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (VHF-PECVD). Tunnel recombination junctions of the “micromorph” tandem solar cells consisting of two microcrystalline-doped layers with a defect rich interface were developed. While the solar cells performed reasonably well under AM 1.5 lights, we found through spectral response measurements that the first deposited cell of the tandem structures was leaking under low light conditions. The insertion of a thin protection layer of n-type amorphous silicon is presented in this paper. The results shown that the introduced n-type amorphous silicon could improve the leakage phenomenon. The leakage phenomenon disappeared when the thickness of the n-type amorphous silicon was 6nm, leading to an increase in open-circuit voltage. The open-circuit voltage increased from 1.27 to 1.33V and FF increased from 60% to 63%.

Key words: very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition; “micromorph” tandem solar cell; n/p tunnel recombination junction

PACC: 8115H; 8630J; 7360F

Article ID: 0253-4177(2008)08-1548-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos.2006CB202602,2006CB202603), the National Natural Science Foundation of China (No.60506003) and the Matching Program for National Science and Technology Plan (No.07QTPTJC29500)

[†] Corresponding author. Email: hxy2006@mail.nankai.edu.cn

Received 31 January 2008, revised manuscript received 25 March 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics