

非晶硅窗口层微结构对晶体硅异质结 太阳能电池的影响

孙晨光², 张丽平¹, 刘文柱¹, 陈仁芳¹, 孟凡英¹,
包健², 陈奕峰², 冯志强², 刘正新¹

(1. 新能源技术中心, 中科院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050

2. 光伏科学与技术国家重点实验室, 常州天合光能有限公司, 常州 213031)

1 研究背景与内容

硅异质结 (SHJ) 太阳能电池因其开路电压高、制备工艺温度低和高温特性优良等特点, 成为较有竞争力的高效太阳能电池之一。2014 年, 日本 Panasonic 公司获得了开路电压为 740 mV 和转换效率为 24.7% 的双面对称结构的 SHJ 太阳能电池^[1]。2015 年, 日本 Kaneka 公司的双面对称结构的 SHJ 太阳能电池也获得了 25.1% 的高转换效率^[2]。SHJ 太阳能电池的关键钝化技术在于: 位于晶体硅两侧表面的高质量氢化非晶硅 (a-Si:H) 薄膜钝化层可以有效降低表面复合速率且提高少数载流子寿命 (τ_{eff})。a-Si:H 薄膜钝化层是取得高效 SHJ 太阳能电池的关键, 其中位于入光面侧的非晶硅薄膜窗口层对电池的光吸收、载流子输运和收集起决定性作用。本文的主要研究内容包括: 1) 利用等离子体增强化学气相沉积技术, 通过调节氢稀释比例, 获得了三种不同材料致密度的 n 型 a-Si:H 薄膜窗口层; 2) 将 3 种不同致密度 a-Si:H 薄膜应用在 SHJ 太阳能电池中, 分析了窗口层致密度对 SHJ 太阳能电池性能的影响。

2 研究结果与讨论

通过调节氢气和硅烷气体的流量比例, 制备了三种不同微结构的 i/n 型复合 a-Si:H 薄膜窗口层。利用分光偏振仪对薄膜的微结构进行测试分析, 图 1 为 3 种 a-Si:H 薄膜的介电函数虚部 ϵ_2 随能量的变化。由图可知, 随着氢稀释比例的增加, 三种薄膜材料对应的 $\epsilon_{2\text{max}}$ 值逐渐增加, 分别为 22.72、23.73 和 24.17。薄膜的介电函数的大小与 a-Si:H 薄膜的材料密度相关, 介电函数值越大, 薄膜的材料密度越大^[3]。相对于较低 $\epsilon_{2\text{max}}$ 的薄膜, $\epsilon_{2\text{max}}$ 为 24.17 的薄膜内的弱键键合数量、空位、孔洞和氢含量较少, 薄膜的光电特性相对较好。

作为窗口层, 光学特性直接决定了光透过率的多少。通过分光光度计对以上三种不同 $\epsilon_{2\text{max}}$ 的 a-Si:H 薄膜进行透过和反射光谱的测试分析, 得到 a-Si:H 薄膜的吸收系数随光子能量的变化, 如图 2 所示。将纵坐标 10^4 所对应的光子能量 E_{04} 近似看作薄膜的光学带隙。由图可知, $\epsilon_{2\text{max}}$ 较大即材料密度较大的光学带隙相对较窄, 反之 $\epsilon_{2\text{max}}$ 较小的光学带隙较宽。薄膜的光学带隙与氢含量有关, 氢含量的增加会导

致光学带隙增大,同时材料致密度反而会少降低^[4]。如果氢含量的增加是用于钝化薄膜内的悬挂键,那么对于材料质量是有贡献的。反之,如果氢含量的过度增加引起了空洞的增加,那么该薄膜对载流子的运输就是不利的。也就是说,高质量的 a-Si:H 薄膜窗口层应具有致密的非晶网络和较宽的光学带隙。

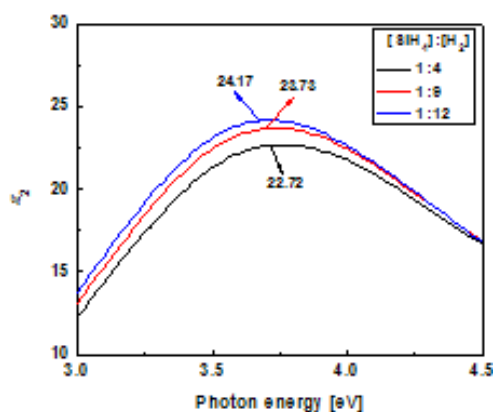


图 1 薄膜的介电函数虚部随光子能量的变化曲线

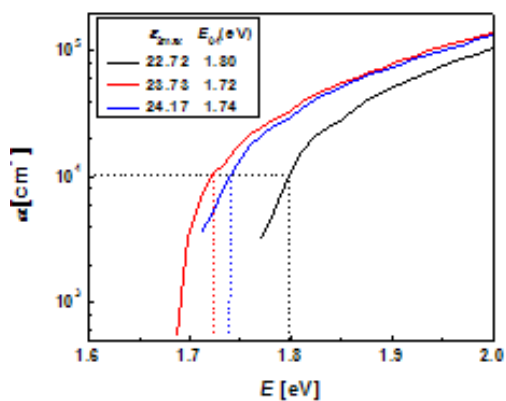


图 2 薄膜的吸收率随光子能量的变化曲线

a-Si:H 薄膜窗口层的质量同样可以体现在对硅片表面的钝化。利用 n/i-a-Si:H/c-Si/i-n-a-Si:H 对称异质结构可以监测 3 种 i/n-a-Si:H 薄膜的电学特性和对晶体硅表面的钝化。图 3 为 τ_{eff} 随载流

子注入浓度的变化曲线。由图可知, τ_{eff} 随着 $\epsilon_{2\text{max}}$ 的增大而增大。随 a-Si:H 薄膜 $\epsilon_{2\text{max}}$ 的增大,薄膜的致密度增加且薄膜内缺陷态也相应减少;同时薄膜微结构密度的增加也有助于 n 型薄膜和 n 型晶体硅形成浅结的场效应增强,因此 $\epsilon_{2\text{max}}$ 值较大的 τ_{eff} 较大。

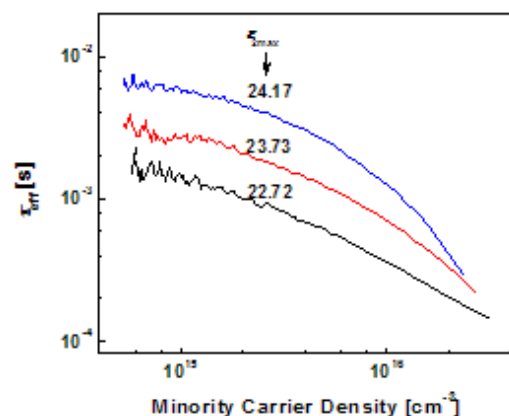
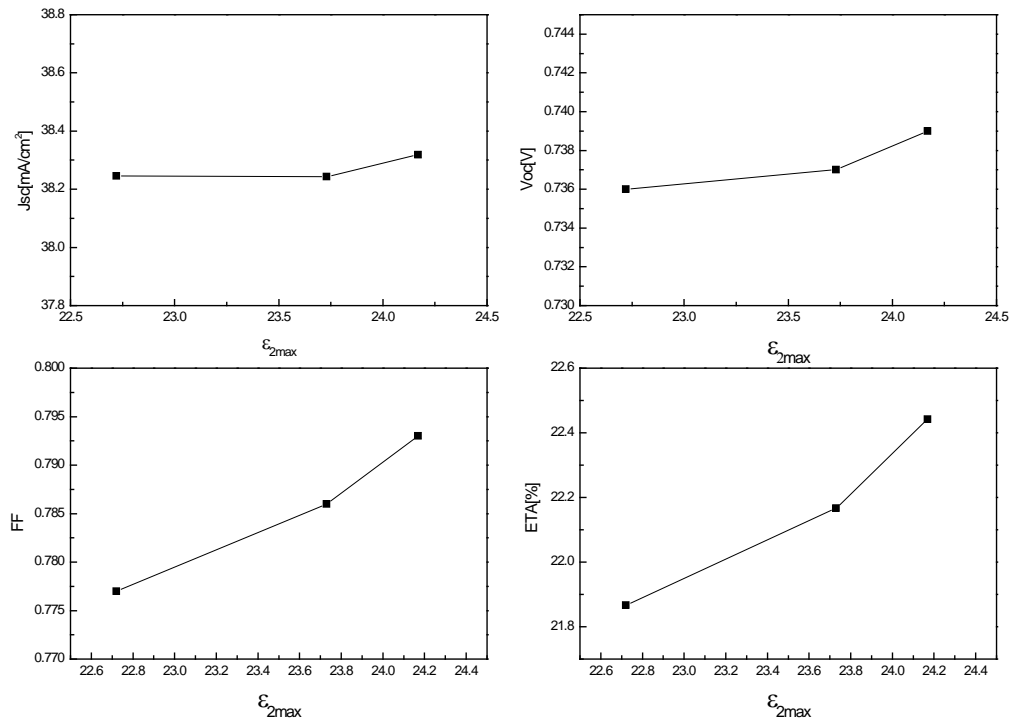


图 3 有效少数寿命随载流子注入浓度的变化曲线

将 3 种 i/n-a-Si:H 薄膜作为窗口层应用于 SHJ 太阳电池,图 4 为太阳电池性能参数随薄膜的 $\epsilon_{2\text{max}}$ 的变化。由图可知,随着 $\epsilon_{2\text{max}}$ 的增大,电池的填充因子 FF 和转换效率 ETA 都相应提高,但短路电流 J_{sc} 和开路电压 V_{oc} 对 $\epsilon_{2\text{max}}$ 变化并不是很敏感。说明随着 $\epsilon_{2\text{max}}$ 增加, i/n-a-Si:H 窗口层薄膜的致密度增加,非晶硅薄膜中的弱键和悬挂键数量减少,改善了载流子的运输特性,使得 SHJ 太阳电池的 FF 和 ETA 相应增大。此外, $\epsilon_{2\text{max}}$ 增加引起的光学带隙减小并没有影响电池的 J_{sc} 减小,说明窗口层的材料密度比光学特性更重要,尽可能少的缺陷态使得载流子在窗口层薄膜内的复合降低,提升了载流子的收集。

图 4 异质结电池性能参数随 ϵ_{2max} 的变化规律

3 结论

本文通过调节氢稀释获得了 3 种不同微结构的 i/n 型非晶硅薄膜, 作为入光侧的窗口层应用在 SHJ 太阳电池中。通过研究非晶硅薄膜窗口层的光电特性对太阳电池性能的影响, 发现: 薄膜材料密度的提升对太阳电池的填充因子改善较明显; 材料密度提升引起的光学带隙减小并不会影响太阳电池的短路电流。综上所述, SHJ 太阳电池的转换效率可以通过增加非晶硅薄膜窗口层的密度而改善。

参考文献

- [1] Tsai C C, Anderson G B, Thompson R. 1991. Non-Cryst. Solids.137-138:673
- [2] Mikio Taguchi, Ayumu Yano, Satoshi Tohoda, et al. 2014. IEEE J. Photovoltaics, vol. 4, no.1:96
- [3] A. Fontcuberta i Morral, P. Roca i Cabarrocas. 2004. Phys. Rev. B 69:125307-1~10
- [4] R. C. Ross, J. Jaklik Jr. 1984. J Appl Phys. 55(10):3785

邮 箱: zlp_wan@mail.sim.ac.cn