

异质结太阳能电池中非晶钝化层的分光椭偏分析

郭万武^{1,2,3} 张丽平^{1,*} 包 健² 孟凡英¹ 陈奕峰² 冯志强² 刘正新^{1,3}

¹新能源技术中心,中国科学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,江苏 常州 213031

³中国科学院大学,北京 100049

摘要 采用分光椭偏(SE)测试技术研究晶体硅(c-Si)异质结太阳能电池用氢化非晶硅(a-Si:H)薄膜钝化层的性能。采用有效媒介理论为基础进行分层多相拟合,研究了a-Si:H/c-Si界面层内部的缺陷散射周期(S_i)、a-Si:H体内孔隙率以及薄膜介电函数峰值随基底温度的变化规律。通过与傅里叶红外转换光谱计算得到的微结构数据对比,发现界面层的 S_i 与薄膜内部SiH和SiH₂含量相关。依据高分辨率透射电镜(TEM)下呈现的形貌特征、有效少数寿命和异质结的implied开路电压等参数的辅助证明,确定SE技术作为一种有效的光学表征手段,能准确快速地判断a-Si:H对c-Si表面的钝化性能,继而定量给出适合晶体硅异质结太阳能电池高质量a-Si:H钝化层生长的最优参数。

关键词 薄膜; 氢化非晶硅薄膜; 分光椭偏测量; 介电函数; 光电特性; 异质结太阳能电池

中图分类号 O472+3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0631002

Analysis of Amorphous Silicon Passivation Layer in Heterojunction Solar Cells by Spectroscopic Ellipsometry

Guo Wanwu^{1,2,3} Zhang Liping¹ Bao Jian² Meng Fanying¹ Chen Yifeng² Feng Zhiqiang²
Liu Zhengxin^{1,3}

¹Research Center for New Energy Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²State Key Laboratory of PV Science and Technology (SKL-PVST), Trina Solar, Changzhou, Jiangsu 213031, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The properties of hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) thin layer are studied by spectroscopic ellipsometry (SE) measurement for the surface passivation of crystalline silicon (c-Si) in heterojunction solar cell. The scatter interval (S_i) of defect at the a-Si:H/c-Si interface, concentration of micro voids and maximum value of dielectric function of a-Si:H layers deposite at different substrate temperatures (T_s) are analyzed by fitting with multilayer mode based on the effective medium approximation. By comprising with the microstructure data calculated from Fourier transform infrared spectroscopy, the correlation between S_i and the H-bond configurations in a-Si:H layer is obtained. According to the measurement results of transmission electron microscope (TEM), effective minority carrier lifetime and implied open circuit voltage, it is demonstrated that SE technique is an effective characterization tool to estimate the surface passivation quality of a-Si:H for c-Si. Thus, the optimal parameters are quantitatively obtained for the deposition of high quality a-Si:H passivation layer for silicon heterojunction solar cell.

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61204005)、国家863计划(2011AA050501)、中国科学院知识创新重要方向性项目(KGCX2-YW-399+11)

作者简介: 郭万武(1982—),男,硕士研究生,主要从事非晶硅薄膜以及高效率太阳能电池方面的研究。E-mail: wanwu.guo@trinasolar.com

导师简介: 刘正新(1976—),性别,博士,研究员,主要从事新型光伏材料及高效率太阳能电池方面的研究。

E-mail: z.x.liu@mail.sim.ac.cn

*通信联系人。E-mail: zlp_wan@mail.sim.ac.cn

Key words thin films; hydrogenated amorphous silicon films; spectroscopic ellipsometry; dielectric function; optoelectronic property; heterojunction solar cells

OCIS codes 310.6860; 310.6845; 160.5335; 310.1620; 310.3840

1 引 言

高质量氢化非晶硅薄膜(a-Si:H)是取得高效晶体硅异质结(SHJ)太阳能电池的关键,其中 a-Si:H 体性能和非晶硅/晶体硅(a-Si:H/c-Si)异质结界面质量是影响整体钝化性能的核心要素,同样也影响 SHJ 太阳能电池整体效率的提升^[1-5]。目前针对 a-Si:H 的微结构因子、光敏性和缺陷态等方面的研究较多,其主要基于硅基薄膜电池的吸收层应用^[6-7]。然而在 SHJ 电池中,关于 a-Si:H 薄膜对晶体硅表面钝化性能的定量研究相对较少,主要因为用于 SHJ 电池的 a-Si:H 薄膜钝化层相对较薄(~5 nm)^[8-9],且 a-Si:H/c-Si 异质结界面质量对薄膜的制备工艺极为敏感^[10],使得对 SHJ 电池钝化机理的研究相对困难。因此,一种有效、便捷的表征手段对晶体硅表面钝化层质量的评估必将为高效 SHJ 电池的研发提供帮助。

分光椭偏光谱(SE)技术作为一种对样品无损的光学测试手段,在光伏器件测试以及薄膜材料研究中有广泛的应用^[11-14]。SE 技术通过偏振片将线偏振光转换成椭圆偏振光,照射到样品表面以后该椭偏光发生反射,根据反射前后光偏振状态的改变来确定样品的各项光学参数^[15]。通过 SE 技术,不仅可以模拟 a-Si:H 薄膜的体内介电函数以及态密度等特性^[16],同时也可以根据光学参数之间的匹配实现器件结构的优化以及对硅基薄膜光学特性的研究^[17-20]。

本研究着手于基底温度(T_s)——影响 a-Si:H/c-Si 界面形貌和 a-Si:H 薄膜体性能的关键因素之一^[21-23]。通过与常规测试技术得到的结果对比可知,SE 技术能够用来有效地表征界面的缺陷态密度以及薄膜的微结构。同时给出 a-Si:H/c-Si 界面层薄膜内部缺陷散射周期(S_i)、孔隙率(C_i)、以 SiH 形式存在的氢含量 C_1 、以 SiH₂ 形式存在的氢含量 C_2 等与钝化性能之间的关系;通过 SE 测试分析结果,给出了适合 SHJ 电池中 a-Si:H 薄膜钝化层生长的最优工艺温度。

2 实 验

2.1 实验条件

本实验中采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术在 N 型 Cz 硅片上沉积双面本征 a-Si:H 薄膜。工艺过程中固定气体配比为:[SiH₄]:[H₂]=1:4,功率和沉积气压之比为 1:4,基底温度 T_s 的变化范围为:150~230 °C。为了减小测试误差,所有非晶硅薄膜的厚度控制在 10 nm 左右。硅片进入 PECVD 腔室之前,经过标准湿式化学清洗法(RCA)清洗,而后采用质量分数为 2% 的 HF 溶液去除氧化膜保护层,并用去离子水漂洗、N₂ 吹干。

为了与 SE 测试进行对比,实验中也采用高分辨率透射电镜(TEM, FEI Tecnai TF-20)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试等对 a-Si:H 薄膜致密度、a-Si:H/c-Si 异质结界面形貌以及不同键合类型的氢含量(C_1 , C_2)等进行了表征。同时,采用准稳态光电导测试系统(QSSPC, WCT-120 Sinton)研究了对称异质结 a-Si:H/c-Si/a-Si:H 结构的少数寿命(τ_{eff})、implied V_{oc} ($V_{oc,im}$)等性能。

2.2 SE 技术理论分析

采用分光椭偏仪(SE, J.A. Woollam, M-2000)测试设备,对 a-Si:H/c-Si 结构测试并拟合分析光学参数。考虑到所制备的样品可能由多种相组成,所以模型中运用有效媒介理论(EMA),且对异质结构采用分层结构拟合:1) 顶层非晶硅薄膜主体部分采用由非晶相、晶体相以及微孔洞三种相组成的结构,模型中非晶相成分的拟合采用 Tauc-Lorentz (TL)模型;2) a-Si:H/c-Si 界面处不可避免地存在外延或局部外延层,因此该界面层采用非晶相和晶体相的混相结构,并采用 TL-Drude 的复合模型拟合,主要得到界面缺陷的特征。通过分析,可以得到 a-Si:H 薄膜的厚度 d 、介电常数 ϵ 、 S_i 、 C_i 等参数。

TL 模型中的拟合参数考虑了被测非晶薄膜的密度、有序度以及光学带隙等。介电函数 $\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$, 其中虚部 ϵ_2 的表达式为^[14, 24-25]:

$$\epsilon_2(E) = \frac{\epsilon_{Amp} \cdot E_0 \cdot Br \cdot (E - E_g)^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + Br^2 \cdot E^2} \cdot \frac{1}{E}, (E > E_g), \quad (1)$$

$$\varepsilon_2(E) = 0, (E \leq E_g), \quad (2)$$

式中 ε_{Amp} 是 ε_2 的峰值, 与薄膜密度相关, E_0 为 ε_2 峰值对应的特征能量, B_r 为 ε_2 的展宽, 表示膜层网络结构的无序度, E_g 为薄膜的光学带隙。

Drude 模型反应了材料中自由载流子对入射光的吸收特性, 同时也考虑了载流子扩散过程中可能受到材料内部缺陷的散射, 根据运动行为引起的吸收特性变化而得到薄膜的介电常数^[15]。该模型假设单个自由电子与体内缺陷不断反复作用周期的平均值为 $\langle S_i \rangle$, 电子的有效质量为 m^* , 传播速度为 v , 平均传播速度为 $\langle v \rangle$, 因此可以得到自由电子的力学方程, 如(3)式所示:

$$F_f = m^* \frac{dv}{dt} = m^* \frac{\langle v \rangle}{\langle S_i \rangle}, \quad (3)$$

在电场作用下, 加速的电子遇到体内缺陷的散射以后, 其运动速度发生变化, 因此在(3)式的基础上, 进一步给出自由电子的运动学方程:

$$m^* \frac{d^2x}{dt^2} = -F_f + F_e = -\frac{m^*}{\langle S_i \rangle} \frac{dx}{dt} - eE_0 \exp(i\omega t), \quad (4)$$

式中 $-F_f$ 表示缺陷对传播电子的阻尼作用, $eE_0 \exp(i\omega t)$ 表示电场的加速作用。结合薄膜内部与介电常数相关的极化模型^[26], 假定(4)式的解是以 $x(t) = A \exp(i\omega t)$ 的形式给出, 则关于 x 的一阶微分和二阶微分可以表示为:

$\frac{dx}{dt} = iA \exp(i\omega t)$ 和 $\frac{d^2x}{dt^2} = -iA\omega^2 \exp(i\omega t)$, 分别代入(4)式即可得到比例常数 A :

$$A = \frac{eE_0}{im^*} \left[\frac{\langle S_i \rangle}{\omega^2 \langle S_i \rangle - 1} \right], \quad (5)$$

另一方面: 如果单位体积内载流子密度为 N_f , 并且根据上述对(4)式的解形式的假设 $x(t) = A \exp(i\omega t)$, 可以得到电介质的极化率:

$$P = -eN_f A \exp(i\omega t) = \varepsilon_0 E (1 - \varepsilon), \quad (6)$$

联立以上(4)、(5)和(6)式以及 $E = E_0 \exp(i\omega t)$, 即可以得到介电常数与薄膜内部缺陷平均散射周期 $\langle S_i \rangle$ 之间的关系:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty \left[1 - \frac{e^2 N_f \langle S_i \rangle}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty m^* (\langle S_i \rangle \omega^2 - i\omega)} \right], \quad (7)$$

式中 ε_∞ 表示高频介电常数, N_f 表示自由载流子密度, m^* 表示有效质量, ε_0 表示真空介电常数。

孔隙率 C_v 的拟合是建立在 EMA 理论之上。EMA 模型对材料不同相成分的比例计算以 Clausius-Mossotti 为基础, 该方程给出了极化率与介电常数的关系, 如(8)式^[26]所示

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{N_c \alpha}{3\varepsilon_0}, \quad (8)$$

式中 ε 表示材料介电常数, N_c 表示材料中极子内部的电子数量, α 表示极化率, ε_0 表示真空介电常数。如果假设待测材料是由两种相(a, b)构成, 则根据 Clausius-Mossotti 方程可以得到(9)式:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} (N_a \alpha_a + N_b \alpha_b), \quad (9)$$

式中 N_a, N_b 分别表示两种相组分的极化子内电子数量, α_a, α_b 分别表示两种组分对应的极化率。根据劳伦兹-洛伦兹关系^[27], 可以将(9)式进一步用相组分比例的形式表示为

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = f_a \frac{\varepsilon_a - 1}{\varepsilon_a + 2} + (1 - f_a) \frac{\varepsilon_b - 1}{\varepsilon_b + 2}, \quad (10)$$

如果将主体电介质成分的介电常数定义为 ε_h , 则(10)式可以写成(11)式:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_h}{\varepsilon + 2\varepsilon_h} = f_a \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_h}{\varepsilon_a + 2\varepsilon_h} + (1 - f_a) \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_h}{\varepsilon_b + 2\varepsilon_h}, \quad (11)$$

根据 Bruggeman 模型假设^[27, 28], 对于主体相成分而言, 可以认为 $\varepsilon_h = \varepsilon$, 则(11)式最终可以写为

$$\sum_{i=1}^n f_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon}{\varepsilon_i + 2\varepsilon} = 0, \quad (12)$$

显然,从(12)式中可以看出所建模型中可以包含多种相组分,而且对应相组分比例以 f_i 定量给出, C_i 亦即表示微孔洞相成分比例,在SE测量技术中,该比例直接通过模型拟合得到。

可见,缺陷散射周期、孔隙率等参量与介电常数相关,因此,本实验在SE光谱分析中,将介电常数 ϵ 作为拟合光学参数来衡量所建模型与实测数据之间的匹配度。基于EMA理论,分别通过TL-Drude复合模型和TL模型给出界面以及薄膜体内的相关特性。

3 结果和讨论

3.1 a-Si:H 薄膜

图1显示了不同 T_s 制备本征a-Si:H的生长速率(R_d),低温下 R_d 较快,随着温度的升高, R_d 呈递减趋势。研究表明基于PECVD技术的硅基薄膜材料制备工艺,其生长速率主要取决于两个竞争因素,即生长基元的键合生长、刻蚀和脱附^[29]。低温下生长表面基元迁移率较低,尤其对于原子H以及H相关基元来说活性较低,且低温导致生长表面的前驱物粘滞度较高不易脱附;高温下生长表面H相关等基元具有较高的迁移率和能量,能够对薄膜生长表面网络进行刻蚀^[30,31],且高温导致的表面弱键脱附增强。因此,低 T_s 下刻蚀作用和脱附效应较弱,使得薄膜生长速率较快,高 T_s 下由于刻蚀作用和脱附效应的增强,生长速率随之减小。目前,有关生长速率对薄膜体缺陷以及微结构的影响机制尚未形成统一的认识,有研究认为 R_d 过高时,容易形成大颗粒以及粉尘相关的缺陷,使得薄膜致密度和微结构等性能退化^[25,32-33]。

为此,采用SE技术并采用分层拟合,得到了a-Si:H/c-Si界面缺陷散射周期(S_t)、a-Si:H体内孔隙率(C_v)与基底温度 T_s 的变化规律。如图2所示,随着 T_s 的升高, S_t 呈增加趋势而 C_v 逐渐降低,该结果表明高 T_s 生长速率较慢,更容易获得低缺陷的界面和相对致密的a-Si:H薄膜,具备较为理想的体性能。相关研究表明,a-Si:H薄膜体内缺陷与Si原子和H原子之间的键合方式有关,SiH类型有利于形成较为致密的薄膜结构,然而SiH₂在薄膜网络中容易引起微孔洞的出现,增加体缺陷^[34]。

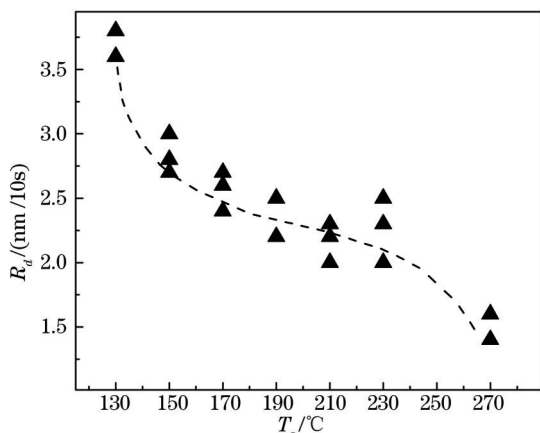


图1 沉积速率 R_d 随着基底温度 T_s 的变化规律

Fig.1 Deposition rate (R_d) as a function of the substrate temperature (T_s)

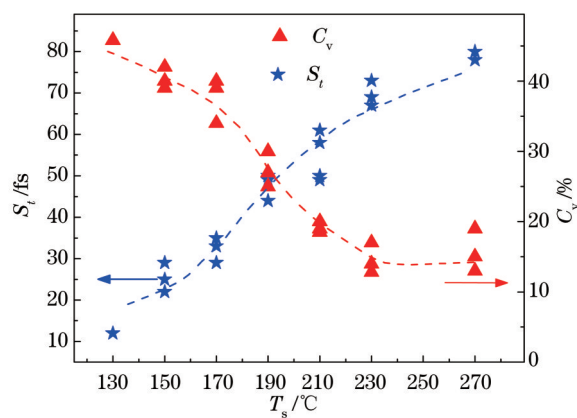


图2 T_s 对界面 S_t (星型标记)以及薄膜内 C_v (三角标记)的影响

Fig.2 Dependence of T_s on the S_t (asterisk) and C_v (upper triangle), respectively

为了辅助证明SE分析结果的可靠性,对上述对应样品进行了FTIR测试,分析了样品的内部微结构特征,包括不同键合类型SiH、SiH₂以及分别所对应的氢含量 C_1 和 C_2 。图3给出了 S_t 与 C_1 、 C_2 以及介电常数虚部峰值(ϵ_{Amp})之间的关系。低 S_t 下, C_2 较高说明H在薄膜内部主要以SiH₂形式存在;随着 S_t 的增加, C_2 明显下降, C_1 先缓慢增加达到一个最大值,而后由于大量H从薄膜体内的溢出而有所减小。可以认为,随着 T_s 的升高,a-Si:H内部以SiH₂形式存在的氢含量(C_2)减小,同时以SiH形式存在的氢含量(C_1)有所增加,研究表明具备这种结构的薄膜相对致密,其体性能较为理想。因此, S_t 的增加表示a-Si:H体性能随着 T_s 的升高得到了一定程度的改善。根据上述对TL模型的介绍以及目前的研究结果^[35-36],介电常数 ϵ_2 能够间接反应材料的密度,峰值 ϵ_{Amp} 的增加也表明了a-Si:H的质量随着 S_t 的增加而逐渐增加。

为了进一步说明以上结论,对具备不同 C_2 含量的薄膜进行了TEM测试,分析了a-Si:H微结构和a-Si:H/c-

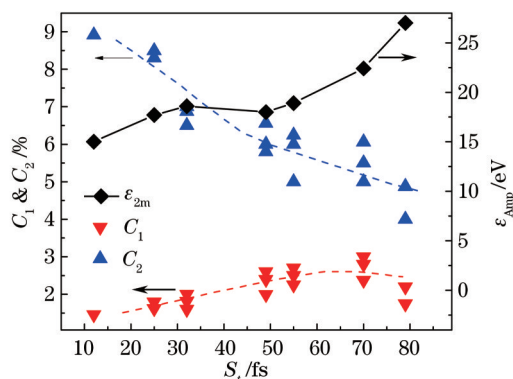


图3 不同构型中氢含量(C_1 , C_2)以及介电常数峰值 ϵ_{Amp} 随 S_i 的变化规律

Fig.3 Hydrogen content in different configurations (C_1 , C_2) and the maximum value of ϵ_{Amp} as functions of S_i

Si 异质结界面等特性。图4是不同 T_s 下 a-Si:H/c-Si 结构截面 TEM 图。由图可知,150 °C 下总厚度约为 10 nm 的 a-Si:H 薄膜顶层结构疏松,被氧化的厚度达到 3.7 nm;随着温度的增加,该疏松层厚度逐渐减小,当温度升至 230 °C 时,疏松层厚度减小至 1.9 nm。由此可得:低 T_s 导致短 S_i 、高 C_1 、高 C_2 和较为疏松的薄膜结构;反之,高 T_s 导致长 S_i 、低 C_1 和低 C_2 , 对应薄膜结构较为致密。图 2、3、4 的结果综合说明:通过 SE 拟合所得的 S_i 、 ϵ_{Amp} 以及 C_i 可以有效地表征 a-Si:H/c-Si 界面和 a-Si:H 薄膜的微结构,并且与 FTIR 获得的微结构变化趋势相一致。

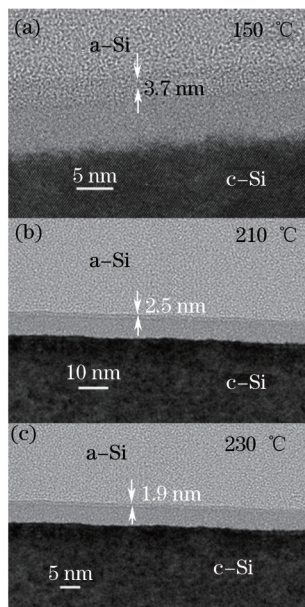


图4 不同温度[(a) 150 °C, (b) 210 °C 和(c) 230 °C]下制备 a-Si:H 截面形貌 TEM 图

Fig.4 TEM cross-sectional micrographs of a-Si:H prepared at different T_s of 150 °C (a), 210 °C (b) and 230 °C (c)

3.2 a-Si:H/c-Si/a-Si:H 异质结性能

上一节中,随着 S_i 的增加,体内孔隙率 C_i 的减小、薄膜致密度随之增加,a-Si:H 体性能得到改善,因此可以推断 a-Si:H 对晶体硅表面的钝化性能也有所提升。本节采用 QSSPC 方法评价了对称异质结结构 a-Si:H/c-Si/a-Si:H 的少子寿命(τ_{eff})和 Implied V_{oc} ($V_{oc,im}$)等性能。其中 $V_{oc,im}$ 表示在没有外加电场且仅光照状态下,a-Si:H/c-Si/a-Si:H 异质结结构的开路电压,该开压忽略了异质结整体串联电阻的影响,仅考虑了与漏电等相关的并联电阻以及与电池实际开压相关的理想因子等因素,能够有效、直观地体现 p-n 结的品质。如图 5 所示, τ_{eff} 和 $V_{oc,im}$ 的值随着 S_i 的增加而增加,在 S_i 为 70 fs 时,获得了最优 $V_{oc,im}$ 为 728 mV 且 τ_{eff} 为 1.2 ms 的钝化结果。

正如 3.1 节中的分析,较低的 T_s 使得薄膜内部 Si 与 H 的键合主要以 SiH_2 的形式存在,与 SiH_2 相关的微孔洞数量必然增加,导致 a-Si:H 薄膜对晶体硅的表面钝化较差,对应 a-Si:H/c-Si 界面存在较多的缺陷,因此 S_i 较短;增加 T_s ,生长表面 H 原子以及相关基元的迁移率和动能都随之增加,使其有能力进一步打断生长表面的弱键且伴随 H 的溢出,因此降低了 C_i 和 C_2 且对应 S_i 也随之变长,薄膜质量相对提高,提升了钝化性能。然

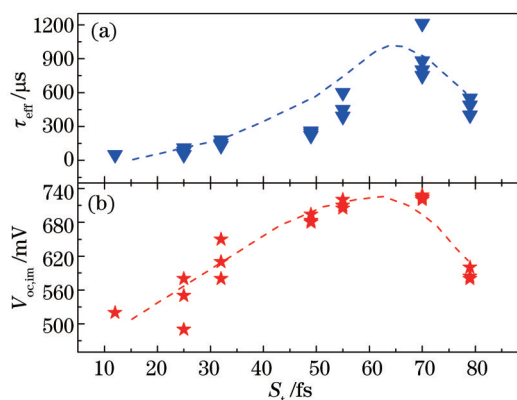


图5 S_1 对钝化性能的影响。(a)有效少数子寿命;(b) implied开路电压

Fig.5 Dependences of S_1 on (a) the effective lifetime (τ_{eff}) and (b) implied open-circuit voltage ($V_{oc,im}$)

而,图5显示当 S_1 进一步增加至大于70 fs时, $V_{oc,im}$ 和 τ_{eff} 反而下降,该现象可能是由于a-Si:H/c-Si异质结界面发生了大面积的连续外延生长所致。

为了证实以上分析,采用TEM观测了a-Si:H/c-Si异质结界面形貌,如图6所示。低温下(150℃)异质结界面相对平坦,无外延生长,随着温度的增加开始出现局部外延情况(210℃),当 T_s 升高到230℃时,a-Si:H/c-Si界面出现明显的连续外延层,整个c-Si界面被外延层薄膜包覆。

结合界面TEM形貌图与SE测试获得 S_1 和 C_s 的变化规律,可以得出:低 T_s 下,a-Si:H薄膜孔隙率较大、结构疏松,对c-Si表面的钝化不充分,且 S_1 较短。即使a-Si:H/c-Si异质结界面无外延生长发生,然而较差的a-Si:H薄膜体性能和较高的界面层缺陷仍然成为制约异质结钝化性能的主要因素。随着基底温度的升高, S_1 增加,SiH₂含量和孔隙率明显下降,薄膜质量得到改善, $V_{oc,im}$ 和 τ_{eff} 都呈上升趋势。然而,随着 T_s 进一步升高(>210℃),界面缺陷散射周期大于70 fs后,界面处生成了大量的界面外延层,由于非晶钝化层厚度较薄,外延层的存在促进了载流子向非晶钝化层表面的移动,故而增加了复合损失,降低了整体钝化性能。此时,由于外延层薄膜的带隙更加接近于晶体硅带隙,使得a-Si:H/c-Si界面的带隙差变小,接近同质结特性,不利于高开压的获得。综上所述,界面形貌和体层带隙的变化均成为影响钝化性能的主导因素,所以当 $S_1 > 70$ fs以后, $V_{oc,im}$ 和 τ_{eff} 呈下降趋势。

综上所述,通过SE测量技术,可以有效地给出基底温度与a-Si:H性能的变化规律。虽然升高 T_s 能够显著增加 S_1 ,然而由于SHJ电池中的钝化性能同时取决于a-Si:H/c-Si异质结界面形貌和a-Si:H体性能两方面的因素,使得在本研究中适合用于SHJ电池的a-Si:H存在最优 T_s (190℃~210℃)和 S_1 (55~70 fs)范围。

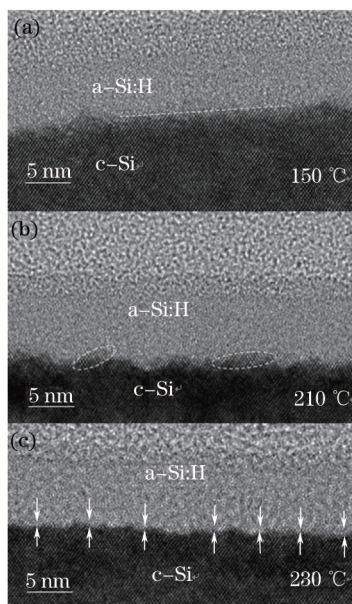


图6 不同温度[(a) 150℃,(b) 210℃和(c) 230℃]下的a-Si:H/c-Si异质结界面形貌TEM图

Fig.6 TEM cross-sectional micrographs at the a-Si:H/c-Si interface prepared at different T_s of 150 °C (a), 210 °C (b) and 230 °C (c)

4 结 论

SE技术能够用来有效表征晶体硅表面上生长的a-Si:H薄膜性能。分别通过TL-Drude的复合模型和TL模型能准确拟合a-Si:H/c-Si界面层缺陷散射周期、a-Si:H体内孔隙率以及薄膜介电常数 ϵ_2 随着基底温度的变化规律,进而可以准确快速地表征并判断最优钝化特性的沉积参数范围。

低的基底温度下,a-Si:H/c-Si界面缺陷散射周期较短且a-Si:H体内孔隙率较大,SiH₂含量较高,对应材料性能较差;随着基底温度的升高,界面缺陷散射周期增加且孔隙率降低、薄膜致密度增加、体性能得到改善,该规律与FTIR和TEM表征结果相吻合。同时,根据钝化性能定量给出适合异质结电池a-Si:H薄膜钝化特性的最优工艺温度为190℃~210℃,且a-Si:H/c-Si/a-Si:H异质结结构获得了 $V_{oc,im}$ 为728 mV和 τ_{eff} 为1.2 ms的钝化结果。

参 考 文 献

- 1 Taguchi M, Terakawa A, Maruyama E, *et al.*. Obtaining a higher V_{oc} in HIT cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and applications, 2005, 13(6): 481-488.
- 2 Tanaka M, Taguchi M, Matsuyama T, *et al.*. Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells: ACJ-HIT (artificially constructed junction-heterojunction with intrinsic thin-layer)[J]. Jpn J Appl Phys, 1992, 31(11): 3518-3522.
- 3 Cleef M, Rath J, Rubinelli F, *et al.*. Performance of heterojunction p+ microcrystalline silicon n crystalline silicon solar cells[J]. J Appl Phys, 1997, 82(12): 6089-6095.
- 4 Rizzoli R, Centurioni E, Plá J, *et al.*. Open circuit voltage in homojunction and heterojunction silicon solar cells grown by VHF-PECVD[J]. J Non Cryst Solids, 2002, 299-302: 1203-1207.
- 5 Wang T H, waniko E I, M R Page, *et al.*. Effect of emitter deposition temperature on surface passivation in hot-wire chemical vapor deposited silicon heterojunction solar cells[J]. Thin Solid Films, 2006, 501(1-2): 284-287.
- 6 Cao X, Stoke J, Li J, *et al.*. Fabrication and optimization of single-junction nc-Si:H n-i-p solar cells using Si:H phase diagram concepts developed by real time spectroscopic ellipsometry[J]. J Non Cryst Solids, 2008, 354: 2397-2402.
- 7 Liu R C, Xia Z H, Wu Y G, *et al.*. Light trapping enhancement in thin film silicon solar cells with different front and back grating periodicities[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(12): 120501.
- 8 Page M, Iwaniczko E, Xu Y, *et al.*. Amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells with varying i-layer thickness[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(14): 4527-4530.
- 9 Dao V, Heoa J, Choi H, *et al.*. Simulation and study of the influence of the buffer intrinsic layer, back-surface field, densities of interface defects, resistivity of p-type silicon substrate and transparent conductive oxide on heterojunction with intrinsic thin-layer (HIT) solar cell[J]. Solar Energy, 2010, 84(5): 777-783.
- 10 Fujiwara H, Kondo M, Impact of epitaxial growth at the heterointerface of a-Si:H/c-Si solar cells[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(1): 013503.
- 11 Wolf S, Kondo M. Abruptness of a-Si:H/c-Si interface revealed by carrier lifetime measurements[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(4): 042111.
- 12 Yang Huiyin, Chen Xue, Qian Ziqing. Design and preparation of ITO film filter used in thermal photovoltaic system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1231003.
杨惠尹, 陈雪, 钱子勃. 热光伏系统中ITO薄膜滤波器设计与制备[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1231003.
- 13 Hu Hui, Zhang Liping, Meng Fanying, *et al.*. Application of spectroscopic ellipsometry for the study of electrical and optical properties of indium tin oxide thin films[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1031003.
胡慧, 张丽平, 孟凡英, 等. 分光椭圆技术在钢锡氧薄膜光电特性研究中的应用[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1031003.
- 14 Sangho K, Vinh A D, Chonghoon S, *et al.*. Low defect interface study of intrinsic layer for c-Si surface passivation in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells[J]. Thin Solid Films, 2012, 521: 45-49.
- 15 Fujiwara H. Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications[M]. Tokyo: Maruzen Co Lid Press, 2003: 174-176.
- 16 Feng G F, Katiyar M, Abelson J R, *et al.*. Dielectric functions and electronic band states of a-Si and a-Si:H[J]. Phys Rev B, 1992, 45(16): 9103-9107.
- 17 Tu Ye, Yang Wen, Yang Peizhi, *et al.*. Optical design and calculation of interlayer in thin film silicon tandem solar cells[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622006.
涂晔, 杨雯, 杨培志, 等. 硅基薄膜叠层太阳能电池中间层的光学设计与计算[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622006.
- 18 Losurdo M, Roca F, Rosa R, *et al.*. Spectroscopic ellipsometry study of interfaces and crystallization behavior during annealing of a-

- Si:H films[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 383(1-2): 69-72.
- 19 Yu Wei, Dai Wanlei, Wang Xinzhao, *et al.*. Band tail photoluminescence of amorphous SiO_x films[J]. *Acta Optical Sinica*, 2012, 32(7): 0731003.
于 威, 戴万雷, 王新占, 等. 非晶氧化硅薄膜带尾发光特性[J]. 2012, 32(7): 0731003.
- 20 He Jian, Li Wei, Xu Rui, *et al.*. Spectroscopic ellipsometry characterization of hydrogenated amorphous silicon thin film[J]. *Acta Optical Sinica*, 2013, 33(10): 1031001.
何 剑, 李 伟, 徐 睿, 等. 氢化非晶硅薄膜的光谱椭偏研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1031001.
- 21 Lenski M, Comes F. Substrate temperature dependent photoelectrical and structural properties of a-Si:H deposited by hydrogen assisted chemical vapour deposition [J]. *Thin Solid Films*, 1996, 288(1): 337-345.
- 22 Wolford D, Reimer J, Scott B. Efficient visible photoluminescence in the binary a-Si:H_x alloy system[J]. *Appl Phys Lett*, 1983, 42(4): 369-371.
- 23 Furukawa S, Matsumoto N. Effects of polysilane formation on the optical and electrical properties of binary Si:H alloys[J]. *Phys Rev B*, 1985, 31(4): 2114-2120.
- 24 Özlem P, Deneb M, Okan Y, *et al.*. Structural and interfacial properties of large area n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-c-Si heterojunction solar cells[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, 22: 69-75.
- 25 Sakika N, Shishida Y, Miyazaki S, *et al.*. High-rate deposition of hydrogenated amorphous silicon films using inductively coupled silane plasma[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2001, 66(1): 337-343.
- 26 Rysselberghe P V. Remarks concerning the clausius-mossotti law[J]. *J Phys Chem*, 1932, 36(4): 1152-1155.
- 27 Aspones D E. Optical properties of thin films[J]. *Thin Solid Films*, 1982, 89(3): 249-262.
- 28 Niklasson G A, Granqvist C G, Hunderi O. Effective medium models for the optical properties of inhomogeneous materials[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(1): 26-30.
- 29 Kessels W, Smets A, Marra D C, *et al.*. On the growth mechanism of a-Si:H[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 383(1-2): 154-160.
- 30 Kamei T, Ganguly G, Hata N, *et al.*. Defect determination kinetics during the growth of a-Si:H[J]. *J Non Cryst Solids*, 1993, 164-166: 43-46.
- 31 Chen H, Gullannar M, Shen W. Effects of high hydrogen dilution on the optical and electrical properties in B-doped nc-Si:H thin films[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 260(1-2): 91-101.
- 32 Ikeda T, Osborne I, Hata N, *et al.*. Enhancement of the deposition rate of a-Si:H by introduction of an electronegative molecule into a silane discharge[J]. *J Non Cryst Solids*, 1996, 198-200: 987-990.
- 33 Gope J, Kumar S, Sudhakar S, *et al.*. Effect of silane flow rate on structural, electrical and optical properties of silicon thin films grown by VHF PECVD technique[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 141(1): 89-94.
- 34 Manfredotti C, Fizzotti F, Boero M, *et al.*. Influence of hydrogen-bonding configurations on the physical properties of hydrogenated amorphous silicon[J]. *Phys Rev B*, 1994, 50(24): 18046-18053.
- 35 Dao V, Lee Y, Kim S, *et al.*. Interface characterization and electrical transport mechanisms in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells[J]. *Journal of the electrochemical society*, 2011, 158(3): H312-H317.
- 36 Jellison G, Modine F. Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region[J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(3): 371-373.

栏目编辑: 张浩佳