

## 分步法高速沉积微晶硅薄膜\*

高海波<sup>1)</sup> 李瑞<sup>1)2)</sup> 卢景霄<sup>1)†</sup> 王果<sup>1)</sup> 李新利<sup>1)</sup> 焦岳超<sup>1)</sup>

1) (郑州大学物理工程学院, 材料物理教育部重点实验室, 郑州 450052)

2) (河南工业大学理学院, 郑州 450002)

(2011年3月12日收到; 2011年4月29日收到修改稿)

为提高微晶硅薄膜的纵向结晶性能, 在甚高频等离子体增强化学气相沉积技术的基础上, 采用过渡参数缓变和两步法相结合的方法在普通玻璃衬底上高速沉积薄膜. 当功率密度为  $2.1 \text{ W/cm}^2$ , 硅烷浓度在 6% 和 9.6% 之间变化时, 从薄膜方向和玻璃方向测算的 Raman 晶化率的差异维持在 2% 以内. 硅烷浓度为 9.6% 时, 薄膜沉积速率可达  $3.43 \text{ nm/s}$ , 从薄膜方向和玻璃方向测算的 Raman 晶化率分别为 50% 和 48%, 差异的相对值仅为 4.0%. 合理控制过渡阶段的参数变化, 可使两个方向的 Raman 晶化率差值下降到一个百分点. 表明采用新方法制备薄膜, 不仅可以抑制非晶孵化层的形成, 改善微晶硅薄膜的纵向结构, 还为制备优质薄膜提供了较宽的参数变化空间.

**关键词:** 微晶硅薄膜, 非晶孵化层, 高速沉积, 甚高频等离子体增强化学气相沉积

**PACS:** 81.15.Gh, 68.55.-a, 61.05.-a, 88.40.-j

## 1 引言

在第二代太阳能电池中, 非晶硅、微晶硅薄膜叠层 (micromorph) 电池因具有比传统单结电池更宽的光谱响应和价格优势而被誉称为大规模光伏发电的理想构型, 进而得到了国内外科研人员的广泛关注<sup>[1-3]</sup>. 基于微晶硅材料低的光吸收率, 作为电池的有源层必须拥有较大的厚度, 于是高速沉积就成了微晶硅薄膜研究的热点<sup>[4]</sup>. 但简单的高速沉积方法在薄膜沉积初期容易产生较厚的非晶孵化层, 严重影响了微晶硅薄膜太阳能电池的性能<sup>[5,6]</sup>. 要实现微晶硅电池的产业化, 就必须尽快解决微晶硅薄膜的优质高速沉积问题. 针对这个问题, 国内外许多研究者进行了不同程度的研究<sup>[7-10]</sup>. 有文献指出, 高速沉积的微晶硅薄膜之所以出现较厚的非晶孵化层, 源于放电初期等离子体不稳定, 并且硅薄膜常常是在玻璃衬底上异质生长而造成的<sup>[6,11]</sup>. 同时, 有人在电子回旋共振沉积薄膜的基础上, 采用氢等离子体处理和两步法相结合的方法, 有效地抑制了非晶孵化层的形成<sup>[12]</sup>. 也有人在热丝化学气相沉积法 (HWCVD) 中, 采用高低速与两步法相结

合的方法, 既保证了薄膜的沉积速率, 又抑制了非晶孵化层<sup>[13]</sup>. 另外, 采用两步法 (先 HWCVD 沉积, 再进行 PECVD 沉积) 制备的本征微晶硅薄膜的优良性能已经在电池效率上得到验证<sup>[14]</sup>. 为了进一步提高薄膜纵向结晶性能, 拓宽制备优质微晶硅薄膜的参数变化范围, 本文采用分步甚高频等离子体增强化学气相沉积 (VHF-PECVD) 法在玻璃衬底上制备微晶硅薄膜, 使得微晶硅薄膜既能高速沉积, 又能保持纵向结构的均匀性, 即利用前期沉积的高质量微晶硅薄层作为后期高速沉积薄膜的诱导层和过渡层, 再用传统的高压耗尽法, 实现微晶硅膜的高速沉积, 最终达到拓宽优质薄膜的制备条件范围的目的.

## 2 实验

所有微晶硅薄膜都是采用中国科学院沈阳科学仪器研制中心研制的 PECVD-X 星型四室电容耦合式系统制备的. 其中, 圆形电极直径 11 cm, 本底真空优于  $4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ , 辉光激发频率为 75 MHz, 反应气体总流量  $150 \text{ mL/min}$ . 上下极板距离 0.8 cm,

\* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2006CB202601) 资助的课题.

† E-mail: jxlu@zzu.edu.cn

基底置于下极板, 温度为 220 °C. 输入功率 200 W 保持不变, 相应的功率密度为 2.1 W/cm<sup>2</sup>, 硅烷浓度分别取值 6%, 7%, 8%, 9%, 9.6%. 具体沉积步骤如下.

第一阶段, 采用易于晶化的低浓度、低功率、低压强条件沉积微晶硅薄膜. 硅烷浓度 2%, 功率 5 W, 气体压强 200 Pa. 其中, 硅烷是在氢等离子体放电 10 min 后缓慢加上的, 反应时间 3 min.

第二阶段, 切换压强至 900 Pa, 调节输入功率、硅烷浓度到高速沉积所需要的参数值, 此过程需要 2 min.

第三阶段, 确认参数后进行高速沉积, 时间 13 min.

采用北京普析 UVWIN 5 型分光光度计对薄膜厚度做出测算. 其中, 折射率  $n$  取标准值 (在 757.2—952.8 nm 波段, 折射率  $n$  变化缓慢, 约为 2.6<sup>[15]</sup>), 薄膜的沉积速率是在扣除最初 3 min 沉积的厚度后计算得出的. 采用 Reinshaw 2000 型 Raman 谱仪分别从薄膜方向和玻璃方向测量 Raman 散射谱, 并由三峰 Gauss 拟合法计算相应的 Raman 晶化率.

### 3 结果与讨论

传统 PECVD 技术高速沉积微晶硅薄膜时, 易造成厚的非晶孵化层, 很难保证纵向结晶均匀. 图 1 是此类微晶硅薄膜透射电镜图<sup>[16]</sup>, 图中标出了一个锥状微晶硅结构. 靠近衬底的白点表示晶核, 衬底和锥状微晶硅之间的部分就是非晶硅孵化层. 这样的薄膜, 要是分别从薄膜方向和玻璃方向测量 Raman 散射谱, 计算得出的 Raman 晶化率会有很大差异.

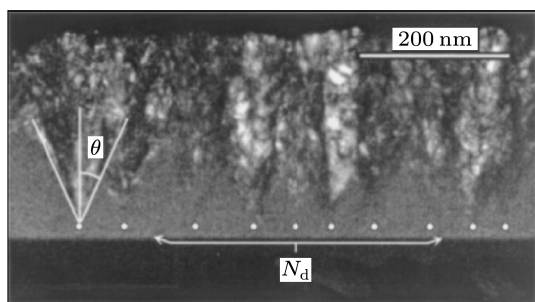


图 1 传统 PECVD 法制备的微晶硅的透射电镜图<sup>[16]</sup>

受半导体行业外延单晶硅薄膜时制备速率比较低的启发, 在沉积微晶硅薄膜的初期, 沉积速率

也不能太高. 于是, 本实验采用分步沉积方法, 先慢速沉积保证初期薄膜是微晶相, 接下来再向高速沉积过渡, 最终使薄膜按照微晶沉积模式高速进行.

### 3.1 微晶硅薄膜 Raman 晶化率随硅烷浓度的变化

图 2、图 3 是分别从薄膜方向和玻璃方向测量的 Raman 散射谱, 图 4 中的 Raman 晶化率是对图 2、图 3 采用三峰 Gauss 拟合法计算得到的. 下三角符号代表从薄膜方向测算的 Raman 晶化率, 上三角符号代表从玻璃方向测算的 Raman 晶化率, 并分别用拟合曲线绘出了各自的变化趋势.

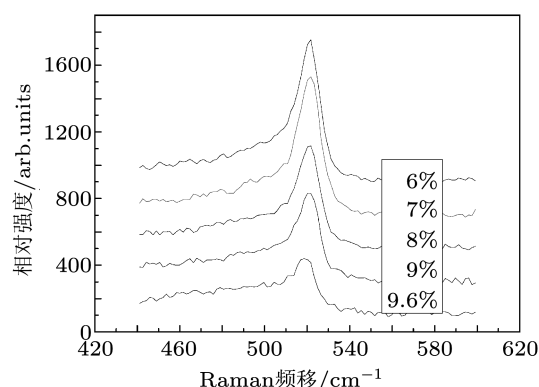


图 2 从薄膜方向测量的 Raman 散射谱

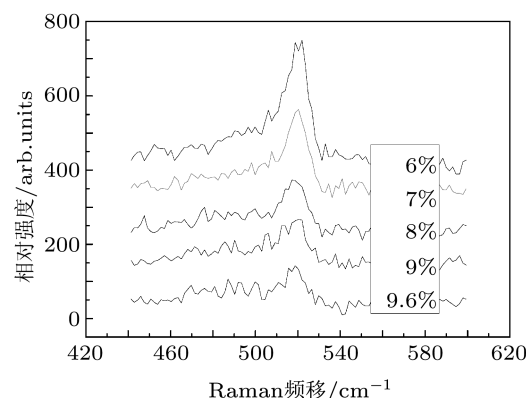


图 3 从玻璃方向测量的 Raman 散射谱

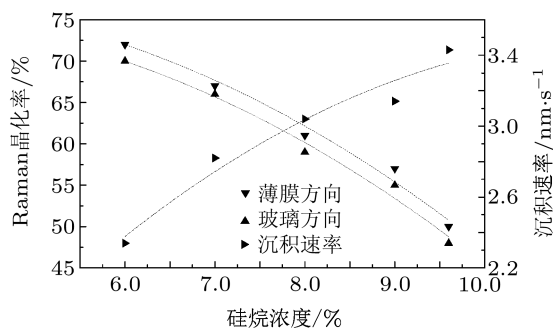


图 4 薄膜的 Raman 晶化率、沉积速率随硅烷浓度的变化

从图 4 的拟合曲线可以看出, 当硅烷浓度从 6% 增加到 9.6% 时, 薄膜方向的 Raman 晶化率从 72% 降到 50%, 玻璃方向的 Raman 晶化率从 70% 降到 48%. 例如, 硅烷浓度 6% 时, 由薄膜方向测算的 Raman 晶化率为 72%, 由玻璃方向测算的 Raman 晶化率是 70%; 硅烷浓度为 8% 时, 两者的 Raman 晶化率分别为 61% 和 59%; 硅烷浓度为 9.6% 时, 两者的 Raman 晶化率分别为 50% 和 48%.

不论是薄膜方向的 Raman 晶化率数据, 还是玻璃方向的 Raman 晶化率数据都揭示了功率密度不变时, 薄膜的 Raman 晶化率随硅烷浓度增加而下降的变化规律. 微晶硅薄膜沉积的化学退火模型<sup>[17]</sup>认为, 微晶硅的 Raman 晶化率与 H 原子有关, 并指出 H 原子是通过进入薄膜次表面 (位于表面几个原子层以下) 促进形成籽晶层而诱导薄膜结晶的. 当其他条件不变时, 随着硅烷浓度的加大, 促使硅烷分解消耗的功率也随之增大, 使得氢气分解获得的原子 H 含量降低. 通常情况下, Raman 晶化率与成膜前驱物  $\text{SiH}_3$  周围的 H 原子含量密切相关, 硅烷浓度的加大以及原子 H 的不断减少共同导致薄膜 Raman 晶化率下降.

仔细观察图 4 中的 Raman 晶化率变化曲线可以看到, 从两个方向测量的 Raman 晶化率的数据存在差异. 薄膜方向的 Raman 晶化率数据普遍高于玻璃方向的, 这恰好证明了微晶硅薄膜沉积初始阶段仍然形成了非晶孵化层. 其次, 更为重要的是, 当沉积功率密度为  $2.1 \text{ W/cm}^2$  时, 即使硅烷浓度从 6% 变化到 9.6%, 虽然薄膜方向的 Raman 晶化率从 72% 下降到 50%, 玻璃方向的 Raman 晶化率从 70% 下降到 48%, 但是从同一样品的两个方向测得的 Raman 晶化率的差异仍然可以保持在 2% 之内, 差异的相对值仅从 2.8% 变化到 4.0%. 这说明虽然薄膜还存在非晶孵化层, 但是很薄. 由此证明分步法沉积的微晶硅薄膜确实有效地抑制了非晶孵化层, 提高了微晶硅薄膜沉积初始阶段的 Raman 晶化率, 显著改善了微晶硅薄膜的纵向结构.

图 4 表明, 当功率密度在  $2.1 \text{ W/cm}^2$  时, 两个方向的相对 Raman 晶化率差值低于 4.0% 的硅烷浓度变化范围是 6% 到 9.6%, 初步实验结果表明, 图 4 中薄膜的 Raman 晶化率和沉积速率随硅烷浓度的变化趋势还可以向高硅烷浓度方向扩展, 这说明沉积参数的优化空间比较宽, 完全可以根据制备微晶硅薄膜电池时对 Raman 晶化率和沉积速率的要求,

选择适当的硅烷浓度和沉积功率, 并且保持比较低的 Raman 晶化率差异.

### 3.2 微晶硅薄膜 Raman 晶化率随沉积时间的变化

为确认本文沉积方法确实提高了微晶硅薄膜的纵向均匀度, 对不同沉积时间 (260, 330, 360, 1080 s) 制备的薄膜进行了 Raman 测试. 厚度分别是 80, 240, 320, 2180 nm. 图 5 列出了这些样品的 Raman 晶化率. 其中, 1080a 表示从薄膜方向测试的 Raman 晶化率, 1080b 表示从玻璃方向测试的 Raman 晶化率.

从图 5 可以看出, 不同沉积时间 260, 330, 360, 1080 s, 对应厚度为 80, 240, 320, 2180 nm 的薄膜, 其 Raman 晶化率都在 68% 附近的 1% 之内. 其中, 1080 s 制备的薄膜的 Raman 晶化率分别为 67.5% 和 68.1%, 差值小于 1%. 这说明, 本文采用的沉积方法不但能有效遏制非晶孵化层的形成, 而且还能改善薄膜的纵向结构, 使薄膜始终以一定的 Raman 晶化率沉积.

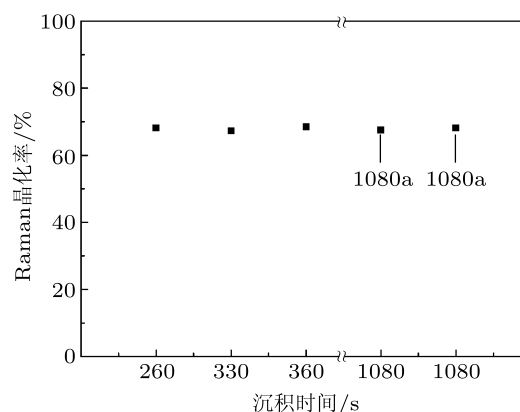


图 5 不同沉积时间的薄膜的 Raman 晶化率

### 3.3 薄膜沉积速率随硅烷浓度的变化

硅烷浓度从 6% 增加到 9.6% 时, 薄膜的厚度分别为 2139, 2567, 2765, 2850, 2912 nm (硅烷不够, 沉积时间少 1 min).

在图 4 中, 右向三角符号表示沉积速率, 相应的拟合曲线描绘了硅烷浓度从 6% 增加到 9.6% 时, 沉积速率的变化趋势. 可以看到, 当功率密度维持在  $2.1 \text{ W/cm}^2$  不变时, 即使硅烷浓度从 6% 增加到 9.6%, 薄膜沉积速率仍然随之升高, 从  $2.33 \text{ nm/s}$  增加到  $3.43 \text{ nm/s}$ . 一般来说, 微晶硅薄膜的沉积速

率受限于成膜前驱物的数量,进而与硅烷浓度、功率密度强烈相关,并受压强、气体总流量等多因素的影响.硅烷浓度对薄膜的沉积速率具有支配作用,提高硅烷浓度,能够带来充足的硅烷供应量,是提高成膜前驱物数量的直接手段.对输入功率而言,较大的输入功率可以提供较多的成膜前驱物,对应较高的沉积速率.在非耗尽区,硅烷供应充分,随着功率的增加,越来越多的 $\text{SiH}_4$ 被分解为成膜前驱物 $\text{SiH}_3$ ,薄膜的沉积速率得到提高<sup>[18]</sup>.然而,到达耗尽区以后,由于存在逆向刻蚀作用,沉积速率又有下降趋势<sup>[19]</sup>.从这个角度来看,本实验处于硅烷耗尽区,相对而言功率一直处于富余状态.加大硅烷浓度后,富余的功率可以分解增加了的硅烷气体,使成膜前驱物增多,增加了薄膜的沉积速率.

### 3.4 微晶硅薄膜沉积参数调节方式对薄膜纵向结晶均匀性的影响

在上述微晶硅薄膜 Raman 晶化率及沉积速率随硅烷浓度的变化实验中,不仅遵循三阶段分步沉积法,而且在过渡阶段都采取缓慢调节参数的方法来保证薄膜的纵向结晶均匀性.例如,沉积的第一阶段采用硅烷滞后注入方法,第二阶段采用压强自然升高,功率、浓度缓慢变化等措施,确保等离子体状态缓慢发生变化,期望制备出纵向结晶比较均匀的微晶硅薄膜.如果将上述 Raman 晶化率差异 2%、差异相对值为 2.8%到 4.0%的实验结果,与图 6 中的实验结果相比较,就清楚地表明即使按照三阶段分步沉积法沉积微晶硅薄膜,但是在过渡阶段不是采取缓慢调节参数的方法,而是采用比较快速的参数调节方法,仍会扩大两个不同方向测得的 Raman 晶化率的差值.其关键在于等离子体状态是否缓慢变化,作为后期高速沉积微晶硅薄膜所需要的诱导层和过渡层(或者简单地称为籽晶层)是否成功生长,在向高速沉积过渡时沉积速率是否平稳增加,是否会形成新的非晶孵化层,从而增大非晶孵化层的厚度,扩大两个不同方向测得的 Raman 晶化率的差异.

图 6 给出了薄膜的 Raman 晶化率、沉积速率随输入功率的变化情况,实验中硅烷浓度保持 9%不变,输入功率从 140 W 增大到 180 W,过渡阶段参数快速变化.从图 6 可以看出,当输入功率从 140 W 增加到 180 W 时,从薄膜方向获取的 Raman 晶化率数值由 140 W 的 60%一直上升到 180 W 的 70%;从玻璃方向获取的 Raman 晶化率

数值由 140 W 的 48%一直上升到 180 W 的 56%.同一样品两个方向测得的 Raman 晶化率相差 12%—14%,差异相对值扩大为 20.0%左右,远大于 3.1 节给出的 2.8%到 4.0%的实验结果.上述对比说明了分步沉积法中过渡阶段参数缓慢调节的重要性.

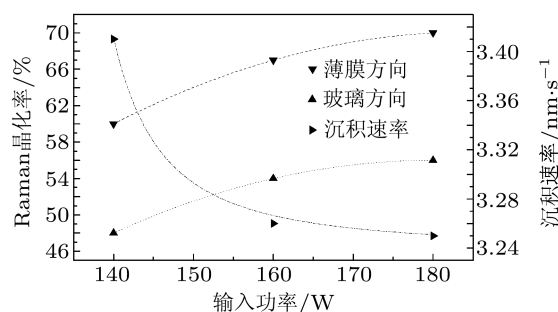


图 6 薄膜 Raman 晶化率、沉积速率随输入功率的变化

### 3.5 微晶硅薄膜 XRD 图谱随硅烷浓度的变化

Raman 散射谱探测深度有限,我们采用的 Ar 532 nm 激光源探测深度大约为 100—200 nm<sup>[20]</sup>,只能反映材料表层的结晶状况.为了探测整个薄膜的结晶情况,我们采用 XRD 辅助分析,其测试深度在 4—6  $\mu\text{m}$  以上.两种测试手段的探测深度不同,在本实验中可以相互补充、相互印证.

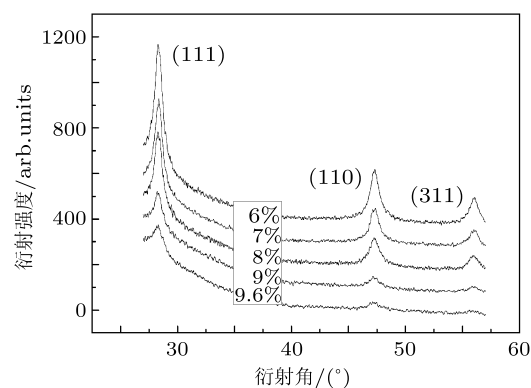


图 7 微晶硅薄膜的 XRD 图谱

图 7 是微晶硅薄膜的 XRD 图谱,这里没有采用 3.1 节制备的样品,而是采用制备时间为 6 min 的薄膜.此时,第一、第二阶段已经完成,第三阶段也已完成 1 min. 6 min 沉积厚度大约为 400 nm.可以看出,当硅烷浓度从 6%增加到 9.6%时,微晶硅薄膜的特征峰 (111), (110), (311) 峰值均有所下降,但明显存在.说明在硅烷浓度从 6%增加到 9.6%的实验范围内,虽然薄膜的 Raman 晶化

率随硅烷浓度的增加有所下降,但薄膜仍具有良好的结晶度.通过 Scherrer 公式对微晶硅的晶粒尺寸进行计算,得到 5 个样品中 (111) 方向的晶粒尺寸最大为 17.3 nm,最小为 12.2 nm; (110) 方向最大为 13.8 nm,最小为 7.5 nm; (311) 方向最大为 14.3 nm,最小为 7.1 nm; 将 3 个方向的大小数值进行平均,得到晶粒最大为 13.9 nm,最小为 12.3 nm. 综合 Raman 分析和 XRD 分析,可以看出本实验样品没有出现三明治的非晶夹层,即两端结晶,中间不结晶,没有出现 Raman 分析结晶、XRD 分析不结晶的情况<sup>[21]</sup>. 说明采用分步沉积,并缓慢调节过渡参数,能保持薄膜纵向结构的均匀性.

### 3.6 微晶硅薄膜暗电导率与光敏性随硅烷浓度的变化

图 8 给出了微晶硅薄膜的暗电导率与光敏性随硅烷浓度的变化情况. 从图 8 可以看到,当硅烷浓度从 6% 增加到 9.6% 时,微晶硅薄膜的暗电导率从  $7.5 \times 10^{-5}$  减小至  $1.3 \times 10^{-6}$ ,与此同时微晶硅

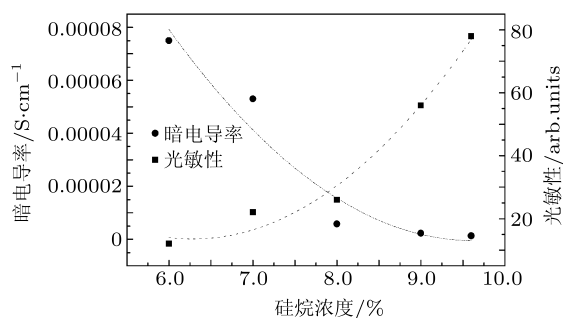


图 8 微晶硅薄膜的暗电导、光敏性随硅烷浓度的变化

薄膜的光敏性,从 12 增加到 78. 一般认为本征微晶硅薄膜的电导率与 Raman 晶化率有密不可分的关系,结晶度高,薄膜的暗电导率高,结晶度低,薄膜的暗电导率低. Raman 晶化率从 72% 降至 50%,暗电导率从  $7.5 \times 10^{-5}$  减小至  $1.3 \times 10^{-6}$ ,这一趋势与理论分析一致. 但是,对比高质量微晶硅薄膜暗电导率数据  $10^{-8}$ — $10^{-7}$  S·cm<sup>-1</sup>, 本文沉积的微晶

硅薄膜的暗电导率偏高,光敏性偏低,薄膜质量还有待进一步改进.

## 4 结论

研究了分步沉积法对微晶硅薄膜纵向结晶的均匀性和沉积速率的影响. 发现运用分步沉积法,并缓慢地调节过渡参数,可以有效地改善高速沉积薄膜的纵向结晶均匀性; 运用分步沉积法,采取过渡参数快速变化的调节方法,薄膜纵向结晶均匀性大大降低. 采用缓变参数过渡法,当功率密度在  $2.1 \text{ W/cm}^2$  时,即使硅烷浓度在 6%—9.6% 范围内变化,也不影响有效抑制非晶孵化层,仍然能改善微晶硅薄膜的纵向均匀性,使薄膜方向和玻璃方向测算的 Raman 晶化率差异维持在 2% 之内,差异的相对值为 2.8%—4.0%. 严格控制过渡阶段的参数,还能使 Raman 晶化率差值降低到 1% 以下. 但是,如果采用比较快速的参数调节方法,薄膜的纵向结晶差异就会大大上升,当分别采取 140, 160, 180 W 的输入功率时,薄膜两个方向的 Raman 晶化率相差分别达 12%, 13%, 14%, 差异的相对值扩大为 20.0%, 远大于缓变调节给出的 2.8%—4.0%. 说明在分步沉积法中,采用缓慢调节参数的过渡方法十分重要. 当功率密度为  $2.1 \text{ W/cm}^2$ , 硅烷浓度为 9.6%, 沉积速率高达 3.43 nm/s 时,仍然制备出结晶均匀的微晶硅薄膜,薄膜方向测算的 Raman 晶化率为 50%, 玻璃方向测算的 Raman 晶化率为 48%, 差值仅有 2%, 差异的相对值为 4.0%. 另外,在缓变参数过渡方法中,即使硅烷浓度在 6%—9.6% 的范围内变化,也能有效抑制非晶孵化层,改善微晶硅薄膜的纵向均匀性,薄膜方向测算的 Raman 晶化率和玻璃方向测算的 Raman 晶化率差异始终保持在 2% 以内,差异的相对值为 4.0% 以下. 这种在高浓度范围内始终保持 Raman 晶化率差异小的规律,经分析还可以继续向右延伸. 也就是说,在更高沉积速率下,依然能制备出 Raman 晶化率差异相当小的薄膜,这为进一步优化沉积薄膜提供了比较大的灵活性.

- [1] Zhang X D, Zheng X X, Wang G H, Xu S Z, Yue Q, Lin Q, Wei C C, Sun J, Zhang D K, Xiong S Z, Geng X H, Zhao Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8231 (in Chinese) [张晓丹, 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 2010 物理学报 **59** 8231]
- [2] Meillaud F, Feltrin A, Despeisse M, Haug F J, Dominé D, Python M, Söderström T, Cuony P, Boccard M, Nicolay S, Ballif C 2011 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 127
- [3] Bugnon G, Feltrin A, Bartlome R, Strahm B, Bronneberg A C, Parascandolo G, Ballif C 2011 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 134
- [4] Takashiri M, Tabuchi T 2010 *Surf. Coat. Tech.* **204** 3525
- [5] Houben L, Luysberg M, Hapke P, Carius R, Finger F, Wagner H 1998 *Philosoph. Mag.* **A 77** 1447
- [6] Verkerk A, Rath J K, Schropp R 2010 *Phys. Status Solid. A* **207** 530
- [7] Suzuki S, Kondo M, Matsuda A 2002 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **74** 489
- [8] Strahm B, Howling A A, Sansonnens L, Hollenstein C, Kroll U, Meier J, Ellert C, Feitknecht L, Ballif C 2007 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **91** 495
- [9] Guo Q C, Geng X H, Sun J, Wei C C, Han X Y, Zhang X D, Zhao Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2790 (in Chinese) [郭群超, 耿新华, 孙建, 魏长春, 韩晓艳, 张晓丹, 赵颖 2007 物理学报 **56** 2790]
- [10] Han X Y, Hou G F, Zhang X D, Wei C C, Li G J, Zhang D K, Chen X L, Sun J, Zhang J J, Zhao Y, Geng X H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3563
- [11] Zhang X D, Zheng X X, Wang G H, Zhao Y 2011 *Appl. Surf. Sci.* **257** 3014
- [12] Yue H Y, Wu A M, Zhang X Y, Li T J 2011 *J. Cryst. Growth* **322** 1
- [13] Mao H Y, Wu D S, Wu B R, Lo S Y, Horng R H 2011 *Mater. Chem. Phys.* **126** 665
- [14] Mai Y, Klein S, Carius R, Stiebig H, Geng X, Finger F 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 073503
- [15] Gao X Y, Li R, Chen Y S, Lu J X, Liu P, Feng T H, Wang H J, Yang S E 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2790 (in Chinese) [郜小勇, 李瑞, 陈永生, 卢景霄, 刘萍, 冯团辉, 王红娟, 杨仕娥 2006 物理学报 **55** 0098]
- [16] Collins R W, Ferlauto A S, Ferreira G M, Chen C, Koh J, Koval R J, Lee Y, Pearce J M, Wronski C R 2003 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **78** 143
- [17] Nakamura K, Yoshino K, Takeoka S, Shimizu I 1995 *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** 442
- [18] Sobajima Y, Nishino M, Fukumori T, Kurihara M, Higuchi T, Nakano S, Toyama T, Okamoto H 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** 980
- [19] Tsai C C, Anderson G B, Thompson R, Wacker B 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **114** 151
- [20] Graf U, Meier J, Kroll U, Bailat J, Droz C, Vallat-Sauvain E, Shah A 2003 *Thin Solid Films* **427** 37
- [21] Guo X J, Lu J X, Wen S T, Yang G, Chen Y S, Zhang Q F, Gu J H 2008 *J. Semiconduct.* **29** 1160 (in Chinese) [郭学军, 卢景霄, 文书堂, 杨根, 陈永生, 张庆丰, 谷锦华 2008 半导体学报 **29** 1160]

# High-rate deposition of microcrystalline silicon thin film by multi-step method\*

Gao Hai-Bo<sup>1)</sup> Li Rui<sup>1)2)</sup> Lu Jing-Xiao<sup>1)†</sup> Wang Guo<sup>1)</sup> Li Xin-Lin<sup>1)</sup>  
Jiao Yue-Chao<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of Material Physics of Education Ministry, School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

2) (College of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

(Received 12 March 2011; revised manuscript received 29 April 2011)

## Abstract

To improve the uniformity of crystalline volume fraction ( $X_c$ ) along the deposition direction in microcrystalline silicon films, very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (VHF-PECVD), combined with parameters smoothly changed two-step method, is adopted to prepare high-rate microcrystalline silicon films on glass substrates. With a power density of  $2.1 \text{ W/cm}^2$ , silane concentration between 6% and 9.6%, a difference between  $X_c$  measured in the film direction and that in the glass direction, is just 2 percent. With a silane concentration of 9.6%,  $X_c$ , measured in the film direction and the glass direction respectively reach 50% and 48%, close to 2 percent, relative difference just 4 percent, whereas the deposition rate reaches 3.43 nm/s. What is more,  $X_c$  difference can reduce to 1 percent by strictly controlling the transitional parameters. It shows that the new deposition method not only curb the incubation layers and improve the vertical structure, but also give a larger range for film optimizing in the future.

**Keywords:** microcrystalline silicon thin film, amorphous incubation layer, high-rate growth, very high frequency plasma enhanced vapor deposition

**PACS:** 81.15.Gh, 68.55.-a, 61.05.-a, 88.40.-j

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB202601).

† E-mail: jxlu@zzu.edu.cn