

多晶硅薄膜材料制备技术研究进展

李 嘉¹, 焦玉娟¹, 周正扬¹, 高肖汉^{1,2*}, 吕雪川¹, 范志平²

(1. 辽宁石油化工大学化学化工与环境学部化学与材料学院, 辽宁 抚顺 113001;
2. 辽宁石油化工大学化学化工与环境学部生态环境研究院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 阐述了多种多晶硅薄膜的制备方法和相关工艺技术, 介绍了各种工艺条件对多晶硅薄膜材料的结构和性能等的影响, 并比较了多种制备方法优点与不足, 并对今后发展趋势和前景做出展望。

关键词: 多晶硅薄膜; 化学气相沉积; 固相晶化; 金属诱导晶化; 太阳能电池

中图分类号: TB43; TN304.1+2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)05-0025-05

Progress in preparation of polycrystalline silicon thin-film

LI Jia¹, JIAO Yu-juan¹, ZHOU Zheng-yang¹, GAO Xiao-han^{1,2*}, LV Xue-chuan¹, FAN Zhi-ping²

(1. College of Chemistry, Chemical Engineering and Environmental Engineering, Liaoning University of Petroleum Chemical Technology, Fushun 113001, China; 2. Institute of ecological environment, College of Chemistry, Chemical Engineering and Environmental Engineering, Liaoning University of Petroleum Chemical Technology, Fushun 113001, China)

Abstract: Various synthesis methods of poly-crystalline silicon films are introduced. The influences of preparation conditions on the quality, structure and properties of poly-Si thin films are analyzed. The advantages and disadvantages of different deposition methods are also compared. The development trends and prospects are proposed as well.

Key words: poly-Si thin films; chemical vapor deposition; solid phase crystallization; metal induced crystallization; solar cells

多晶硅薄膜 (polycrystalline silicon thin film) 是一种新型太阳能光电材料, 具有较高的光敏性以及良好的光电稳定性, 近年来被广泛应用于太阳能光伏发电、集成电路、平板显示器等领域^[1-3]。

在不同生长条件下得到的多晶硅 (Poly-Si) 晶粒大小不等, 排列不同。每个晶粒晶向不同, 但会表现出一种主要的生长取向, 即为择优取向。它影响着多晶硅薄膜的光电性能和结晶效果。因此, 研究制备优质多晶硅薄膜, 就是研究如何加大晶粒尺寸而减少晶界, 并具有高度择优取向。本文中结合近些年多晶硅薄膜的研究情况, 综述了多种多晶硅薄膜材料的制备方法, 并介绍了不同制备方法和工艺条件对 Poly-Si 生长过程以及多晶硅薄膜的结晶度、晶粒尺寸、择优取向、光电性能等的影响, 并比较了多种制备方法的优点与不足。

目前, 多晶硅薄膜的制备方法很多。按照 Poly-Si 的沉积温度高低来分类, 可分为高温制备技术 (>600℃) 和低温制备技术 (<600℃)。高温制备采用石英石、硅片等作为衬底, 工艺简单, 但是造

价较高, 目前仅应用于尺寸很小的少数显示设备中; 低温制备则利用廉价、透明、易于大面积制备的玻璃为衬底进行制备, 该工艺应用较广泛, 但制备工艺相对复杂。按照多晶硅薄膜的制备工艺则可以分为直接制备法和间接制备法。

1 直接制备法

直接制备法是指通过改变反应条件, 控制初始晶粒的形成和长大, 在基片上直接得到 Poly-Si。

1.1 等离子体增强化学气相沉积法

等离子体增强化学气相沉积法 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 是一种非常流行的薄膜制备技术, 采用 $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ 的混合气体作为气体源, 借助等离子体辉光放电将气体电离或激发, 产生反应所需的活性基团, 活性基团在基片表面发生化学反应并沉积在基片上, 从而得到 Poly-Si 层。这是一个非常复杂的动力过程, 涉及反应室多个气相反应、衬底表面反应以及自由基向基板传输的过程。PECVD 法制备 Poly-Si 时, 等离子体内部各种

收稿日期: 2014-12-02; 修回日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21003069, 21103078); 辽宁石油化工大学环境科学与工程学科创新团队 ([2014]11 号)

作者简介: 李嘉 (1992-), 男, 本科生; 高肖汉 (1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为纳米材料的制备和应用、有机合成、有机催化等, 通讯联系人, 024-56861711, gaoshan@163.com。

离子的活性较强,可以得到高的增长率($>1 \text{ nm/s}$),能实现中低温条件下的薄膜快速沉积。Wu 等^[4]使用微波电子回旋共振等离子体增强型化学气相沉积技术(ECR-PECVD),以 H_2 为等离子体源, SiH_4 为气源(经氩气稀释, $\text{Ar}:\text{SiH}_4 = 19:1$),在普通廉价玻璃上成功制备了本征缺陷少、结晶率高(90%)、高度(220)择优取向的柱状结构的多晶硅薄膜。实验表明,增大原子氢通量,离子、荷电集团对沉积表面的轰击作用随之增大,能够提高粒子迁移率和晶粒生长速率,使得到的 Poly-Si 层致密性较好。多晶硅薄膜的结晶率也会显著增大,并在 25 sccm 氢通量时达到最大 96%。但随着氢通量进一步加大,结晶率反而出现下降,加剧了薄膜无序化程度。另外,较高的衬底温度也有利于 Poly-Si 的生长。衬底温度在室温时只能得到非晶硅薄膜(a-Si),当温度逐步提升至 100°C 时, Poly-Si 开始出现并呈现(111)择优取向,结晶度较低,温度升高到 300°C 后,多晶硅薄膜结晶度可达到 93.4%(图 1^[4])。

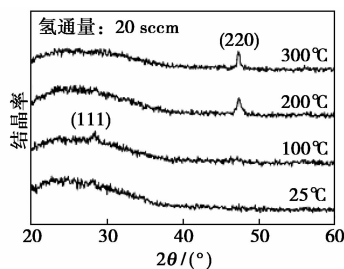


图 1 在不同温度下沉积的多晶硅薄膜 XRD 谱图

目前,对 PECVD 的认识仍然是有限的^[5],等离子体的引入存在一定的复杂性,对不同种类活性基团的形成和对衬底碰撞过程的认识还不够深入。另外,确定所涉及的所有化学物质和物理化学过程是一项艰巨的任务,获得化学过程的准确速率常数也十分具有挑战性。

(上接第 24 页)

- [24] 李广欣,韩冬云,曹祖宾,等.页岩油脱氮新方法的研究[J].石油化工高等学校学报,2010,23(2):50-52.
- [25] 翟学研,李萍,曹祖宾,等.页岩抽出油中氮化物脱除方法研究[J].化学工业与工程,2010,23(2):495-498.
- [26] 王妍,张改美,宋林,等.抚顺页岩油碱性氮化物的脱除[J].当代化工,2011,40(8):856-858.
- [27] 王珏,刘洁,李文深,等.络合法脱除页岩油中碱性氮化物的实验研究[J].化学与粘合,2011,33(6):42-45.
- [28] 张哲鸣,赵德智,张含明,等.页岩油脱碱性氮化物的研究[J].辽宁石油化工大学学报,2011,31(3):24-27.
- [29] 徐明,陈登峰,肖双全,等.大庆页岩油脱氮工艺实验研究[J].

1.2 热丝化学气相沉积法

热丝化学气相沉积法(hot wire vapor chemical deposition, HWCVD)也叫做催化化学气相沉积(Cat-CVD),是指在反应室内放置高温 Wu、V 等金属热丝,气源在高温催化作用下发生催化裂解反应,提高 SiH_3^+ 和 SiH_2^+ 的含量,使硅原子扩散并在较低温度的衬底上直接沉积得到多晶硅。

影响薄膜质量的因素很多:①硅烷浓度与反应室压强;②催化金属的选择与排布;③金属丝与衬底的距离;④衬底材料与温度等。张俊丽等^[6]用 HWCVD 法进行了在玻璃衬底上沉积硅薄膜的研究,并指出在一定的硅烷浓度范围里,降低硅烷浓度有助于提高薄膜结晶度,而硅烷浓度过大会得到非晶态的薄膜。另外,较高的衬底温度有利于薄膜的结晶,而且衬底距离越小,得到的薄膜结晶度越高。张磊等^[7]采用 HWCVD 法,分别选择石英玻璃、铝掺杂氧化锌导电玻璃(AZO)、Si(100)和 Si(111)为衬底,研究了不同衬底对多晶硅薄膜的择优取向、薄膜应力和晶化率的影响。其中,以 Si(111)作为衬底的样品,其晶态比达到了最高 96.6%,且几乎没有内应力,而石英、AZO、Si(100)上沉积的 Poly-Si 薄膜均存在内应力。

HWCVD 法的优点是沉积速率高、沉积温度低,制得的 Poly-Si 择优取向(220)明显。缺点则是温度较高时,催化热丝的自身挥发会对材料造成污染,降低多晶硅薄膜质量,此问题还有待进一步解决。另外, Poly-Si 薄膜的均匀性受催化金属的选择与热丝几何排布的影响较大,要实现较大面积上的均匀沉积多晶 Si 薄膜,也需要改善技术来实现,这是 HWCVD 法取得大规模工业应用的关键所在。

1.3 低压化学气相沉积法

低压化学气相沉积法(low pressure chemical

石油学报:石油加工,2012,28(1):55-59.

- [30] 胡阳,曹萍,王雷,等.页岩油馏分油非加氢脱氮技术研究[J].化学工业与工程,2011,28(1):48-52.
- [31] 李少凯,李琳璐,沈健,等. USY 吸附脱除页岩柴油中的碱性氮[J].辽宁石油化工大学学报,2013,33(1):22-24.
- [32] 周传志,李东胜,刘洁.页岩油作催化裂化原料的研究[J].化学工业与工程,2010,27(3):241-246.
- [33] 孙会东,李术元.一种改善页岩油柴油馏分安定性的组合工艺[J].中外能源,2009,14(4):75-77.
- [34] 袁萌萌,曹祖宾,韩冬云.脱除页岩油中碱性氮化物的工艺研究[J].石化技术与应用,2010,28(4):320-322. ■

vapor deposition, LPCVD) 是指气体源 (SiH_4 、 Si_2H_6 等) 在低压条件下被热分解, 从而直接在衬底上沉积多晶硅。LPCVD 法制备的薄膜晶粒具有 (110) 择优取向, 形貌呈“V”字形, 并且有良好的电学特性, 晶粒大小能控制在 50 nm 左右, 该方法沉积速度快, 成膜均匀致密, 适合大面积生产。赵晓锋等^[8] 采用 LPCVD 法, 以高纯 SiH_4 为气源, 620℃ 温度下在 p 型 (100) 晶向单晶硅上制备了纳米级 Poly-Si。

沉积温度较高可以说是 LPCVD 法技术最大的缺点, 由于廉价的普通玻璃软化温度只有 500 ~ 600℃, 因此衬底的选择受到限制, 必须采用石英作为衬底。另外, 根据许帅等^[9] 的报道, 在实际工艺生产中, 多种系统工艺条件变化都会使淀积的多晶硅颗粒变粗, 形成凸点, 使多晶硅表面呈现出“发雾”现象。因此, 需要稳定硅烷气体流量, 采用低温低压工艺, 并选择适当的淀积速率, 同时还要保持气路系统的清洁和控制基片表面缺陷, 来消除多晶发雾情况。

2 间接制备多晶硅薄膜

直接制备法的工艺相对简单, 但晶粒尺寸小 (≤ 50 nm), 且晶粒之间间隙大, 使薄膜缺陷较多。因此, 为获取更高品质的多晶硅薄膜, 人们把视线转向了间接制备法。间接制备法是指先在衬底上制备一层 a-Si 薄膜, 再通过一系列的热工艺处理将非晶硅薄膜进一步转化为多晶硅薄膜^[10]。

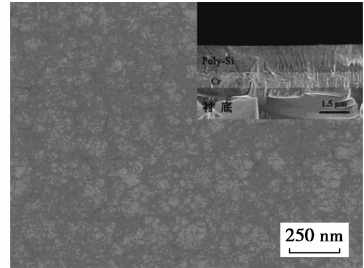
2.1 固相晶化

固相晶化技术 (solid phase crystallization, SPC) 是应用最早、最简单的间接制备多晶硅薄膜技术, 主要包括高温炉退火法和快速热退火法。

高温炉退火法以硅烷作气源, 550℃ 时在衬底上沉积 a-Si 层, 然后在 600℃ 以上高温条件将 a-Si 薄膜熔化后, 再缓慢降温, 熔融的硅会再次晶化并转化为多晶硅。在制备过程中, 退火温度与退火时间直接影响 Poly-Si 的晶化效果。此外, 非晶硅材料的初始无序度越高, 晶粒成核速率越低, 所得到的 Poly-Si 薄膜的晶粒也越大。高温炉退火法的优点在于制备的 Poly-Si 晶粒大而均匀、成本低, 可实现大面积制备。缺点是煅烧温度高 (550℃) 和煅烧时间长 (24 h)。

快速热退火法 (RTA) 是近年发展迅速的固相晶化新技术, 采用光加热方式, 退火热源为卤钨灯, 加热速度快, 能够在几十秒内迅速升温到 1 000℃ 以

上^[11]。Zhang 等^[12-13] 先在石英衬底上沉积 a-Si, 并嵌入 Cr 来抑制结晶硅的剥落, 然后在温度 1 100℃ 持续 5 s, 结晶度达到 96.3%, 持续加热 20 s, 薄膜结晶度就达到 97.3%。从横断面图像 (图 2^[12]) 中可以看出薄膜表面很平坦, 没有出现气泡和空洞, 说明 RTA 法能得到表面缺陷少的 Poly-Si 薄膜。



1 100℃ 持续 20 s 横断面扫描

图 2 RTA 法制备的 Poly-Si 薄膜表面扫描电镜图

RTA 法属于高温制备工艺过程, 不适合耐热能力低的玻璃衬底, 所以衬底多采用单晶硅和石英。随着现代玻璃制备技术的发展与改进, 耐热高温玻璃材料在硅薄膜材料制备方面会有很好的应用。

2.2 金属诱导晶化

金属诱导晶化 (metal induced crystallization, MIC) 是在 a-Si 薄膜上镀一层金属薄膜, 或在镀有金属的基片上沉积一层 a-Si 薄膜, 然后通过热处理, 金属原子和非晶硅原子相互扩散, 使 a-Si 转变成 Poly-Si。MIC 法属于低温制备, 能提高晶化效率, 缩短晶化时间 (2 ~ 3 h), 并且对衬底材料的要求较低, 容易实现大面积制备, 在近年来逐步受到关注。

其中, 以铝作为诱导金属的铝诱导晶化法 (AIC) 因其便宜易得受到众多研究者的青睐^[14-15]。AIC 法的退火温度低于 a-Si 和 Al 的共晶温度 577℃, 同时低温会减缓 Si 层与 Al 层的扩散互换, 降低成核率而形成较大晶粒。Huang 等^[16] 使用 AIC 法在玻璃衬底上制备得到了连续均匀、择优取向 (110) 的 Poly-Si 薄膜。通过横截面扫描电镜图 (图 3^[16]) 可以看出, 经过热处理, Al 和 a-Si 发生层交换, 得到了沉积于玻璃基底的统一的 Poly-Si 层, 而上层是 Al 和 Si 的混合物。图 4^[16] 显示了不同退火时间下 Poly-Si 层的光学显微镜照片, 退火处理 45 min 后没有形成连续的 Poly-Si 层, 只有被 Al 网络孤立的 Poly-Si 晶粒。退火处理 60 min 后, 得到了连续的 Poly-Si 层。

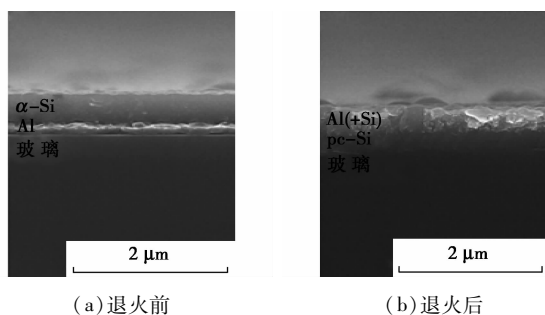


图 3 样品退火前后横截面扫描电镜照片

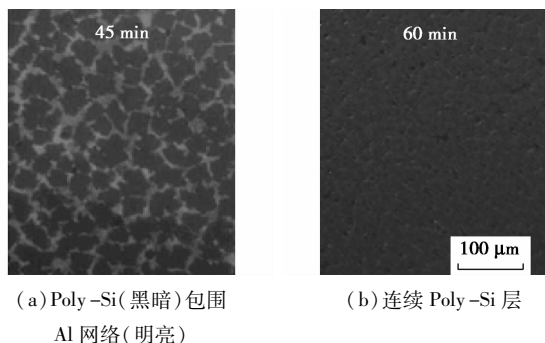


图 4 光学显微镜下 Poly-Si 层的照片

过去数年间, AIC 法已经被证实是低温制备大晶粒 Poly-Si 薄膜的优秀方法。人们对 AIC 法制备 Poly-Si 薄膜过程中影响 Poly-Si 薄膜结构和性能的诸多因素做了研究, 例如退火温度和时间^[17]、衬底特性^[18-19]以及 Al/a-Si 的厚度比^[20]等。王宙等^[17]通过 AIC 法制备的 Poly-Si 薄膜晶粒分布均匀, 晶粒尺寸约为 0.5 ~ 5 μm, 晶化率为 89%。另外, Mina 等^[18]的研究认为, AZO 衬底可以提高 Poly-Si 薄膜生长率, 增大晶粒尺寸。但是 Gall 等^[19]则提出 AZO 衬底能够减小晶粒尺寸, 缩短晶化时间, 并且增强成核率而降低生长率。因此, AZO 衬底对 AIC 法制备 Poly-Si 薄膜的影响还需要通过更多研究来认识。

此外, 有很多其他金属(Ni、Ge、Cu、Pd、Pt)都可以用来进行金属诱导晶化, 金属不同, 其晶化效果不同。张良艳^[21]在玻璃衬底上制备 Poly-Si 薄膜时使用的是金属 Ni, 得到了 Ni 诱导晶化的优良的工艺参数, 起始温度为 460℃, 退火时间为 4 h 以及退火温度为 530℃。邓书康等^[22]在硅衬底上使用 Ge 来诱导晶化制备了晶粒尺寸为 76 nm 的 Poly-Si 薄膜。其研究还表明, a-Si/Ge 薄膜经 600℃ 退火 5 h, 晶化率达到 44%, 而没有 Ge 填充层的 a-Si 薄膜在 800℃ 退火 5 h 后的薄膜晶化率为 46%。说明 Ge 诱导晶化可有效降低 a-Si 薄膜的晶化温度。

但使用 AIC 法也会由于引入金属而给 Poly-Si

薄膜造成污染, 粒子迁移率降低, 使设备的电气性能受到极大的影响。因此, 对晶化机理的进一步研究, 以及研究如何去除表面金属-Si 层, 和对金属含量和去金属后迁移率大小的测量是下一步金属诱导晶化的一个研究重点。

2.3 准分子激光晶化法

准分子激光晶化(excimer-laser crystallization, ELC)是当前得到实用化的一种低温制备多晶硅薄膜方法, 已经被广泛应用于太阳能光伏和半导体等行业领域^[23]。它是将高能量激光束入射到 a-Si 薄膜表面, 极短时间里积聚能量, 表面的热效应能使 a-Si 熔化结晶成为 Poly-Si。简单说就是 a-Si 从熔融到再固化的再结晶过程。

a-Si 到 Poly-Si 的转变前提是激光能量密度达到了其阈值能量密度, 从而熔化 a-Si 薄膜。在激光晶化过程中激光能量密度、激光频率以及激光波长都影响薄膜的结晶。增加激光能量密度, 能增加晶体晶粒尺寸, 提高薄膜迁移率和结晶度, 并且硅薄膜全部熔化时薄膜晶化度最好, 晶粒颗粒达到最大^[24]。而继续增加激光能量密度, 反而使薄膜的结晶效果减弱。同样, 随着激光频率的增加, 薄膜晶粒尺寸也会出现先增加后降低的现象^[25]。此外, 当激光为长波段时, 薄膜内部受热更加均匀, 成核晶粒较大, 有利于制备大晶粒的多晶硅薄膜^[26]。

由于 ELC 过程中, a-Si 熔化再结晶的时间只有几十纳秒, 对衬底热冲击很小, 因此可采用廉价普通玻璃或柔性有机衬底来大面积生长 Poly-Si 薄膜, 并且 ELC 法可以对薄膜进行区域选择, 从而实现 a-Si 和 Poly-Si 在同一衬底上的集成。

3 结论与展望

多晶硅薄膜在太阳能的光伏应用已经展现了极其诱人的市场前景, 在大幅度降低成本和节约能源方面也十分具有吸引力。基于上述研究结果, 探究多晶硅薄膜材料制备技术的发展, 可以得出以下结论。PECVD 法是低温沉积 Poly-Si 薄膜的主要方法。LPCVD 法是集成电路所用多晶硅薄膜的制备中普遍采用的标准方法。不同沉积温度、衬底材质、氢通量等参数影响直接合成法合成的 Poly-Si 的结晶度、晶粒尺寸和光电性能。SPC 法仍然是目前制备大晶粒多晶硅薄膜的主要方法, 但是其烧结温度高, 烧结时间长。AIC 法也已被证实是低温制备大晶粒多晶硅薄膜的可行方法。ELC 法已有大型的生产线设备, 工艺相对成熟, 被认为是目前综合性能

最好的方法。以下则是多晶硅薄膜制备未来的研究重点和发展趋势。

(1) 需要继续研究 Poly-Si 的形成、生长机制和诸多因素对其性能影响的机理, 还有从动力学和热力学角度分析薄膜的结晶过程以及结晶驱动力。

(2) 晶粒尺寸和形态、薄膜择优取向、有害杂质的含量及分布是影响 Poly-Si 薄膜光电性能的重要因素。所以需对其制备方法和条件进行优化, 在保证沉积速率的前提下尽可能改善 Poly-Si 薄膜的晶粒尺寸及其形态, 控制晶体定向生长。进一步提高生长速度、降低沉积温度, 从而制备出优质的 Poly-Si 薄膜。

(3) 多晶硅薄膜要实现大规模生产需要解决两大问题: 一是 Poly-Si 薄膜大面积制备时的均匀性差; 二是不同多晶硅制备工艺得到的多晶硅器件性能差异较大。因此, 需加大研究多晶硅材料多领域的具有产业化意义的大面积实际应用, 这将会一直作为研究的重点。

参考文献

- [1] Becker C, Amkreutz D, Sontheimer T, *et al.* Polycrystalline Silicon thin-film solar cells: Status and perspectives [J]. *Solar Energy Mater Sol Cells*, 2013, 119: 112–123.
- [2] Wang C L, Lee I C, Wu C Y, *et al.* High-performance polycrystalline Silicon thin-film transistors with two-dimensional location control of the grain boundary via excimer laser crystallization [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, 12 (7): 5505–5509.
- [3] Cui H, Campbell P R, Green M A. Compatibility of glass textures with E-beam evaporated polycrystalline silicon thin-film solar cells [J]. *Applied Physics A*, 2013, 111 (3): 935–942.
- [4] Wu A, Deng W, Qin F, *et al.* Fabrication and its characteristics of low-temperature polycrystalline silicon thin films [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52 (1): 260–263.
- [5] Tsalikis D G, Baig C, Mavrantzas V G, *et al.* A hybrid kinetic Monte Carlo method for simulating silicon films grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2013, 139 (20): 204706.
- [6] 张俊丽, 傅杰财, 郭小松, 等. HWCVD 在玻璃衬底上沉积硅薄膜的研究 [J]. *材料导报*, 2010, 24 (s1): 288–290.
- [7] 张磊, 沈鸿烈, 黄海宾. 不同衬底对 HWCVD 制备多晶硅薄膜结晶性能的影响 [C]. 南京: 东南大学出版社, 2010: 618–621.
- [8] 赵晓锋, 温殿忠, 王天琦, 等. 薄膜厚度和退火温度对纳米多晶硅薄膜特性影响 [J]. *功能材料*, 2010, (10): 1753–1756.
- [9] 许帅, 徐超, 王新胜, 等. LPCVD 多晶硅薄膜发雾的形成与消除 [J]. *电子与封装*, 2012, 12 (2): 40–43.
- [10] Man H Y, Wu D S, Wu B R, *et al.* Hot-wire chemical vapor deposition and characterization of polycrystalline silicon thin films using a two-step growth method [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 126 (3): 665–668.
- [11] Fan C, Lin Y, Yang Y. Performance improvement with a combined scheme of rapid thermal annealing and multi-channel structure for poly-Si TFTs with various device dimensions [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2012, 61 (8): 1308–1313.
- [12] Zhang L, Shen H, You J, *et al.* Polycrystalline silicon films fabricated by rapid thermal annealing [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2012, 23 (7): 1279–1283.
- [13] Zhang L, Shen H, Jiang X, *et al.* Influence of annealing temperature on the properties of polycrystalline silicon films formed by rapid thermal annealing of a-Si:H films [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2013, 24 (11): 4209–4212.
- [14] Gestel V D, Gordon I, Poortmans J. Aluminum-induced crystallization for thin-film polycrystalline silicon solar cells: Achievements and perspective [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 119: 246–255.
- [15] Prathap P, Tuzun O, Madi D, *et al.* Thin film silicon solar cells by AIC on foreign substrates [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95 (1): 44–52.
- [16] Huang T, Chen N, Zhang X, *et al.* Aluminum induced crystallization of strongly (111) oriented polycrystalline silicon thin film and nucleation analysis [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53 (11): 3002–3005.
- [17] 王宙, 曹健, 室谷贵之, 等. 铝诱导晶化真空蒸镀多晶硅薄膜的研究 [J]. *功能材料*, 2012, 43 (5): 573–575.
- [18] Mina Jung, Okada A, Saito T. In situ observation of polycrystalline silicon thin films grown using aluminum-doped zinc oxide on glass substrate by the aluminum-induced crystallization [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50 (4): 2–4.
- [19] Gall S, Becker C, Lee K Y, *et al.* Growth of polycrystalline silicon on glass for thin-film solar cells [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2010, 312 (8): 1277–1281.
- [20] 唐正霞, 沈鸿烈, 江丰, 等. AIC 多晶硅薄膜的制备与其上 HWCVD 低温外延生长多晶硅薄膜的研究 [J]. *人工晶体学报*, 2012, 41 (6): 1757–1761.
- [21] 张良艳. 金属诱导多晶硅薄膜制备与研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [22] 邓书康, 康昆勇, 郝瑞亭, 等. Ge 诱导晶化多晶 Si 薄膜的制备及结构表征 [J]. *光电子·激光*, 2011, 22 (1): 75–78.
- [23] Kim Y M, Jeong K S, Yun H J, *et al.* Investigation of the instability of low-temperature poly-silicon thin film transistors under a negative bias temperature stress [J]. *Electronic Materials Letters*, 2013, 8 (1): 13–16.
- [24] 陈盛, 史伟民, 金晶, 等. 激光晶化非晶硅薄膜的表面机理研究 [J]. *功能材料与器件学报*, 2010, 16 (6): 565–569.
- [25] 王强, 花国然, 顾江. 激光脉冲频率对不同衬底上非晶硅薄膜晶化的影响 [J]. *半导体光电*, 2014, (2): 282–285.
- [26] 周德让, 段国平, 陈俊岭, 等. 激光波长对非晶硅薄膜晶化效果的影响 [J]. *光电子·激光*, 2013, 24 (10): 1948–1952. ■