

# 多晶硅薄膜太阳能电池的研究现状\*

吴斌 汪建华 满卫东 熊礼威 谢鹏 孙蕾

(武汉工程大学等离子体化学与新材料省重点实验室, 武汉 430073)

**摘要:**综述了各类太阳能电池的优缺点和研究应用现状,介绍了多晶硅薄膜太阳能电池的基本结构及制备工艺和多晶硅薄膜的各种不同制备方法及其优缺点,最后对多晶硅薄膜太阳能电池的研究及应用前景进行了展望。

**关键词:**太阳能电池;多晶硅;薄膜

**中图分类号:** O482.7 **文献标识码:** A

## Research Status of Polycrystalline Silicon Thin-film Solar Cells\*

WU Bin WANG Jianhua MAN Weidong XIONG Liwei XIE Peng SUN Lei

(Province Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Material, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073)

**Abstract:** In this paper, the virtues, flaws and application of research of all kinds of solar cells were summarized. The basic structure and technology of polycrystalline silicon thin-film solar cells and the preparation methods, advantages and disadvantages of the various polycrystalline silicon thin-film were introduced. In the end, The research and application prospects of the polycrystalline silicon thin-film solar cells were outlooked.

**Key words:** solar cells; polycrystalline silicon; thin-film

## 1 引言

能源和环境是二十一世纪面临的两个重大问题,据专家估算,以现在的能源消耗速度,可开采的石油资源将在几十年后耗尽,煤炭资源也只能供应人类使用约200年。太阳能电池作为可再生无污染能源,能很好地同时解决能源和环境两大难题,具有很广阔的发展前景。照射到地球上的太阳能非常巨大,大约40 min照射到地球上的太阳能就足以满足全球人类一年的能量需求<sup>[1]</sup>。因此,制备低成本高光电转换效率的太阳能电池不仅具有广阔的前景,而且也是时代所需。

## 2 太阳能电池的种类

太阳能电池种类繁多,主要有硅太阳能电池、聚光太阳能电池、无机化合物薄膜太阳能电池、有机薄膜太阳能电池、纳米晶薄膜太阳能电池和叠层太阳能电池等几大类。

### 2.1 硅太阳能电池

目前,硅太阳能电池占太阳能电池的绝大部分(94%)<sup>[2]</sup>,根据硅片厚度的不同,可分为晶体硅太阳能电池和薄膜硅太阳能电池两大类。

#### 2.1.1 晶体硅太阳能电池

晶体硅太阳能电池有单晶硅(c-Si)和多晶硅(p-Si)太阳能电池两类,最早出现的是利用切片技术(硅片厚度约0.5 mm)制备的c-Si太阳能电池,而后带状硅技术的出现,避免了切片的操作,随着丝网印刷和机械刻槽技术的出现,c-Si太阳能电池的性能得到了进一步提高。而后用p-Si代替c-Si并应用c-Si太阳能电池的一些技术,如选择腐蚀发射结、金属吸杂、腐蚀绒面、表面钝化、细金属栅电极等等,制备了p-Si太阳能电池。与c-Si太阳能电池相比,p-Si太阳能

电池成本低,但存在明显的晶粒界面和晶格错位等缺陷而导致光电转化效率相对较低。目前c-Si和p-Si太阳能电池的应用已经进入大规模发展阶段,然而,c-Si和p-Si太阳能电池的成本因需高纯Si原材料而居高不下,其发展受到了一定的限制。据报道c-Si太阳能电池最高光电转化效率已达24.7%(理论最高光电转化效率为25%)<sup>[3]</sup>;Geogia采用磷吸杂和双层减反射膜技术,制备了光电转化效率为18.6%的p-Si太阳能电池<sup>[4]</sup>;新南威尔士大学光伏中心采用类似PERL电池技术,制备了光电转化效率为19.8%的p-Si太阳能电池<sup>[5]</sup>;中国能源网报道,德国弗劳恩霍夫协会科研人员于2004年采用新技术,在世界上率先使p-Si太阳能电池的光电转换效率突破20%大关,达到20.3%。

#### 2.1.2 薄膜硅太阳能电池

薄膜硅太阳能电池(硅膜厚约50 μm)的出现,相对晶体硅太阳能电池,所用的硅材料大幅度减少,很大程度上降低了晶体硅太阳能电池的成本。薄膜硅太阳能电池主要有非晶硅(a-Si)、微晶硅(μc-Si)和多晶硅(p-Si)薄膜太阳能电池,前两者有光致衰退效应,其中μc-Si薄膜太阳能电池光致衰退效应相对较弱但μc-Si薄膜沉积速率低(仅1.2 nm/s)<sup>[6]</sup>,光致衰退效应致使其性能不稳定,发展受到一定的限制,而后者则无光致衰退效应问题,因此是硅系太阳能电池的发展方向<sup>[7]</sup>。日本三菱公司在石英(SiO<sub>2</sub>)衬底上制备的多晶硅薄膜太阳能电池的光电转化效率达到16.5%,德国Fraunhofer研究所在石墨和碳化硅(SiC)衬底上制备的p-Si薄膜太阳能电池的光电转化效率分别为11%和9.3%,日本SONY公司用多孔硅分离技术制备的p-Si薄膜太阳能电池的光电转换效率达到12.5%<sup>[8]</sup>;a-Si薄膜太阳能电池的光电转换效率已达14.5%<sup>[9]</sup>;μc-Si薄膜太阳能电池的光电转换效率已达9.8%<sup>[10]</sup>。

## 2.2 聚光太阳能电池

聚光是降低太阳能电池总成本的一种方法,通过聚光器(倍率一般大于几十倍,有反射式和透镜式两种)将较大面积

\* 基金项目:湖北省教育厅项目(Q20081505 等离子体辅助固体接触法图形化CVD金刚石膜的研究);武汉工程大学绿色化工过程省部共建教育部重点实验室2008年度开放基金(RGCT200801)。

的阳光聚在一个较小的范围内,形成“焦斑”或“焦带”,并将太阳能电池置于“焦斑”或“焦带”上,以增加光强,克服太阳辐射能流密度低的缺陷,从而获得更多的电能输出<sup>[11]</sup>。与普通太阳能电池相比,聚光太阳能电池因需耐高倍率的太阳辐射,所以要求在较高温度下光电转换性能良好的半导体材料,最理想的半导体材料是单晶硅和砷化镓(GaAs)。聚光太阳能电池通常采用垂直结构,以减少串联电阻,同时栅线较密,约占电池面积的10%,以适应大电流密度的需要。Speetrolab于2003年开发的Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/GaAs/Ge电池的光电转换效率高达35.2%(66个太阳强度)<sup>[12]</sup>,Speetrolab又于同年7月25日公布了地面聚光电池的光电转化效率可达36.9%<sup>[13]</sup>。目前投产的三结Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/GaAs/Ge聚光太阳能电池光电转化效率为28%(AM1.5,100~300个太阳强度)。聚光太阳能电池虽然有很高的光电转化效率,但光学聚光系统比较复杂,并且需要跟踪太阳,散热也非常困难。目前所用的聚光太阳能电池较少,聚光倍数均较低,成本相应较高。

### 2.3 无机化合物薄膜太阳能电池

选用的无机化合物主要有CdTe, CdS, GaAs, CuInSe<sub>2</sub> (CIS)等,其中CdTe的禁带宽度为1.45 eV(最佳产生光伏响应的禁带宽度为1.5 eV),是一个理想的半导体材料,截止2004年,CdTe电池光电转化效率最高为16.5%<sup>[14]</sup>;CdS的禁带宽度约为2.42 eV,是一种良好的太阳能电池窗口层材料,可与CdTe、SnS和CIS等形成异质结太阳能电池<sup>[15-18]</sup>;GaAs的禁带宽度为1.43 eV,光吸收系数很高,GaAs单结太阳能电池的理论光电转化效率为27%,目前GaAs/Ge单结太阳能电池最高光电转换效率超过20%,生产水平的光电转换效率已经达到19~20%,其与GaInP组成的双节、三节和多节太阳能电池有很大的发展前景<sup>[19]</sup>;CIS薄膜太阳能电池实验室最高光电转化效率已达19.5%<sup>[20]</sup>,在聚光条件下(14个太阳光强),光电转化效率达到21.5%<sup>[21]</sup>,组件产品的光电转化效率已经超过13%<sup>[22]</sup>;CIS薄膜用Ga部分取代In,就形成CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>(简称CIGS)四元化合物,其薄膜的禁带宽度在1.04~1.7 eV范围内可调,这为太阳能电池最佳禁带宽度的优化提供了机会,同时开发了两种新的材料,用Ga完全取代In形成CuGaSe<sub>2</sub>,用S完全取代Se形成CuInS<sub>2</sub>,以备In、Se资源不足时可以采用。但是,Cd和As是有毒元素,In和Se是稀有元素,严重地制约着无机化合物薄膜太阳能电池的大规模生产<sup>[23]</sup>。

### 2.4 有机薄膜太阳能电池

有机薄膜太阳能电池与硅太阳能电池相比具有质量轻、柔韧易加工性、低成本及可大面积制备等优点,有很大的发展潜力,但正处于研发初期,激子结合能大,电子迁移率低,导致光电转化效率低且寿命短等缺点<sup>[24]</sup>。目前,在实验室特定研究条件下,有机薄膜太阳能电池光电转换率可达9.5%<sup>[25]</sup>。

### 2.5 纳米晶薄膜太阳能电池

目前半导体纳米晶薄膜太阳能电池电极所广泛使用的

半导体是锐钛矿型二氧化钛(TiO<sub>2</sub>),TiO<sub>2</sub>虽然具有无毒、稳定、制备工艺简单且抗腐蚀性能好等特点,但是禁带宽度为3.2 eV,只能吸收波长小于380 nm的紫外光,因此光电转化效率低。研究纳米晶薄膜太阳能电池最成功的是瑞士科学家Gratzel等人,他们于1991年提出的染料Ru(dcbpy)<sub>2</sub>[(μ-CN)Ru(CN)(bpy)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>敏化纳米TiO<sub>2</sub>薄膜作为阳极的太阳能电池,以较低的成本制备了光电转化效率为7.1~7.9%的太阳能电池<sup>[26]</sup>,在这一领域取得了突破性进展。随后这种电池以其原料低廉和制作工艺简单等优点而引起人们的广泛关注,Gratzel等人又于2006年对工艺改进后将光电转化效率提高到11.3%<sup>[27]</sup>。

### 2.6 叠层太阳能电池

鉴于单结电池只能将太阳光谱中一定波长的光能有效地吸收并转换成电能,由此将不同带隙宽度的半导体材料叠加起来,分别吸收不同波长范围的入射光,从而提高太阳能电池的光电转化效率,因此出现了双结、三结和多结叠层太阳能电池。

#### 2.6.1 GaAs 叠层太阳能电池

GaAs叠层太阳能电池主要有双结和三结两种,CHUNG等人于1988年采用金属有机化学气相沉积法(MOCVD)生长制备Al<sub>0.37</sub>Ga<sub>0.63</sub>As/GaAs双结叠层太阳能电池,其光电转化效率达到23%,此后该太阳能电池的研究未取得新的进展;黄子乾等<sup>[28]</sup>用金属有机化合物气相沉积法(MOVPE)生长制备GaInP/GaAs双结叠层太阳能电池,通过对掺杂剂、生长技术及条件的调整与改进,极大地提高了GaInP/GaAs双结叠层太阳能电池的性能,最高光电转换效率达到23.8%,国际上已经达到25.7%<sup>[29]</sup>;三结Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/GaAs/Ge叠层太阳能电池在2000年最高光电转化效率达到29%,2002年大批量生产平均光电转化效率达到26.5%<sup>[30]</sup>。

#### 2.6.2 CdTe 叠层太阳能电池

化合物半导体CdTe的禁带宽度为1.45 eV,很接近太阳能电池需要的最优化禁带宽度(1.5 eV),是一种制备太阳能电池极佳的半导体材料,CdTe太阳能电池的理论光电转换效率在29%左右<sup>[31]</sup>。由于禁带宽度的变化,CdTe/CdS界面上的互扩散会显著影响材料的光学性质,同时CdS是六方结构而CdTe是立方结构以及约9%的失配度从而导致在界面上产生高密度的面缺陷和线缺陷<sup>[32]</sup>,致使距其理论光电转换效率还有很大的差距。目前,实验室CdTe/CdS太阳能电池的最高光电转换效率为16.5%<sup>[33]</sup>。李愿杰等<sup>[34]</sup>研制的CdS/CdTe太阳能电池为国内先进水平,其光电转换效率已达国内最高(13.38%,0.5 cm<sup>2</sup>)。该科研组又于2007年研制了CdS/CdTe叠层太阳能电池,其开路电压最高达到了852 mV,短路电流密度最大为13 mA/cm,填充因子最高为55.2%,这种叠层电池的光电转化效率达到了8.16%(0.071 cm<sup>2</sup>)。

#### 2.6.3 非晶硅(a-Si)叠层太阳能电池

多晶硅(p-Si)的禁带宽度为1.12 eV,比非晶硅(a-Si)小(1.7 eV),作为a-Si/p-Si叠层太阳能电池底电池的光吸收

体,能有效地吸收从顶电池透射下来能量小于 a-Si 禁带宽度的太阳光,从而提高太阳能电池的光电转换效率,已制备出光电转换效率为 12% 的 a-Si/p-Si 叠层太阳能电池<sup>[35]</sup>; CuInSe<sub>2</sub> 的禁带宽度为 1.04 eV,光吸收系数很高,是一种理想的叠层太阳能电池底电池材料,已制备出光电转换效率为 13% 的 a-Si/CIS 叠层太阳能电池<sup>[36]</sup>;薛俊明等<sup>[37]</sup>采用射频等离子体增强化学气相沉积法(RF-PECVD)制备 a-Si 顶电池,采用甚高频等离子体增强化学气相沉积法(VHF-PECVD)制备微晶硅( $\mu$ c-Si)底电池,并优化了 a-Si/ $\mu$ c-Si 叠层太阳能电池顶电池与底电池的本征吸收层厚度匹配与电池电流匹配,以及氧化锌/金属复合背反射电极对电池的作用,研制出了光电转化效率为 9.83% 的薄膜 a-Si/ $\mu$ c-Si 叠层太阳能电池(1.0 cm<sup>2</sup>);朱锋等<sup>[38]</sup>通过调整 a-Si 顶电池 N 层和  $\mu$ c-Si 底电池 P 层的厚度,降低 NP 隧穿结的影响,获得光电转化效率为 11.73% 的 a-Si/ $\mu$ c-Si 叠层太阳能电池(0.25 cm<sup>2</sup>)。

a-Si/a-SiGe/a-SiGe 三结叠层结构的出现,大大提高了太阳能电池在太阳光谱中的长波吸收,较小面积(0.25 cm<sup>2</sup>)的转换效率达 15%<sup>[39]</sup>,由于 Ge 材料昂贵,现在开始研究 a-Si/a-Si/a-Si 三结叠层太阳能电池<sup>[40]</sup>。

### 3 多晶硅薄膜太阳能电池的简单结构和制备工艺

多晶硅薄膜太阳能电池的结构和制备工艺虽然有所不同,但原理上是一致的,图 1 和图 2 分别是其简单结构和制备工艺。多晶硅薄膜太阳能电池的制备过程中:衬底材料有玻璃、c-Si、p-Si、SiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 膜等;隔离层是在衬底上再沉积一层薄膜,如在玻璃衬底上沉积 SiO<sub>2</sub> 薄膜,起介质层(绝缘)和隔膜层(阻止衬底中杂质渗入多晶硅薄膜)的作用;籽晶层一般用低温等离子体法(LPCVD)制备;通过再结晶等方法使晶粒增大;用 CVD 等方法在其上生长多晶硅薄膜;p-n 结可在沉积多晶硅薄膜的同时掺硼、磷等获得;光学限制即上下表面织构化和减反射;电学限制即制备前后电极的欧姆接触;电极制备方法主要有丝网印刷、光刻、电子束蒸发和电子镀膜等;钝化包括晶粒晶界钝化和表面钝化<sup>[41-43]</sup>。

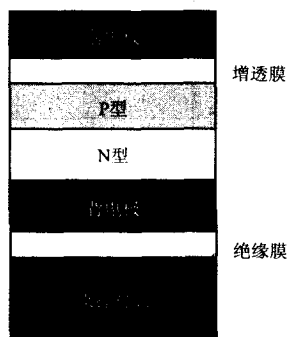


图 1 多晶硅薄膜太阳能电池的简单结构

Fig. 1 Basic structure of polycrystalline silicon thin-film solar cells

### 4 制备多晶硅薄膜的工艺方法

多晶硅薄膜是多晶硅薄膜太阳能电池的主体部分,薄膜

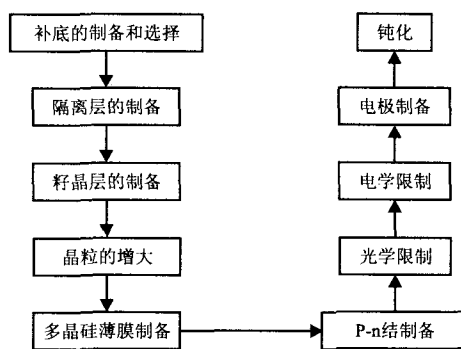


图 2 多晶硅薄膜太阳能电池的制备工艺

Fig. 2 Technology of polycrystalline silicon thin-film solar cells

质量的好坏直接影响太阳能电池性能的好坏。多晶硅薄膜制备工艺的主要区分点在其沉积温度和沉积方式,因此不同的沉积温度和沉积方式的控制直接影响薄膜的质量,从而影响着多晶硅薄膜太阳能电池的光电转换效率。主要的多晶硅薄膜的制备方法有:化学气相沉积法(CVD)、再结晶法、液相外延法(LPE)、溅射沉积法和等离子喷涂法(PSM)。

#### 4.1 化学气相沉积法(CVD)

##### 4.1.1 一般化学气相沉积法(CVD)

该法先用加热器将衬底加热至适当的温度,然后通以反应气体(如 SiF<sub>4</sub>、SiH<sub>4</sub> 等),在还原气氛(H<sub>2</sub>)下反应生成硅原子并沉积在衬底表面形成薄膜。反应温度较高(800~1200℃),且难以形成较大的颗粒多晶硅,并且容易在晶粒之间形成孔隙,对制备较高光电转换效率的太阳能电池很不利。随着技术的进步又出现了等离子增强化学气相沉积法(PECVD)和热丝化学气相沉积法(HFCVD)。

##### 4.1.2 等离子增强化学气相沉积法(PECVD)<sup>[44]</sup>

该法是在非硅衬底上制备晶粒较小的多晶硅薄膜的一种方法,其制备温度很低(100~400℃),晶粒很小(约 10<sup>-7</sup> m 数量级),但已属于多晶硅薄膜,几乎没有效率衰减问题。邱春文等<sup>[45]</sup>以 SiF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> 混合气体作为反应气源时能在低温下(<400℃)制得大颗粒(直径 > 100 nm)、择优取向(220)明显的优质多晶硅薄膜,加入少量的 SiH<sub>4</sub> 气体后,多晶硅薄膜的结构并不会发生明显的改变,但其生长速率提高了将近 10 倍,达到 0.92 nm/s。目前用这种方法制备的多晶硅薄膜太阳能电池的光电转换效率已经达到 10.7%,但是该方法也存在生长速度慢且薄膜易受损等问题,有待今后研究改进。

##### 4.1.3 热丝化学气相沉积法(HFCVD)

该法的热丝是耐高温且有一定韧性和机械强度的金属丝,一般为钨丝或钽丝,金属丝通电后发热至高温,电离反应气体(SiF<sub>4</sub>、SiH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 等)产生等离子体,发生复杂的物理化学反应之后形成硅原子,硅原子再沉积在基片上形成薄膜。王丽春等<sup>[46]</sup>用 HFCVD 法在普通玻璃衬底上低温沉积多晶硅薄膜,研究热丝与衬底间距(5~10 mm),热丝温度(1400~1800℃)和衬底温度(205~320℃)对多晶硅薄膜的晶化率、晶粒尺寸、晶粒取向以及形貌的影响规律。实验结果表明:随着热丝与衬底间距增加,多晶硅薄膜的晶化率和晶粒尺寸明显减小;随着热丝温度的降低,多晶硅薄膜的晶化率先不

断增大后突然大幅度减小。

#### 4.2 再结晶法

该法一般先用CVD法在衬底上沉积一层较薄的非晶硅或微晶硅层,再用结晶技术对这层硅薄膜进行再结晶,可得到较大晶粒的多晶硅层。再结晶技术沉积温度比较低,可选用廉价的玻璃衬底取代昂贵的石英或单晶硅衬底,从而大幅度降低生产成本。到目前为止,再结晶技术主要有:固相晶化法(SPC)、区熔再结晶法(ZMR)和金属诱导结晶法(MIC)。

##### 4.2.1 固相晶化法(SPC)<sup>[47-49]</sup>

该法是用CVD等方法在比较低的温度下(<600℃)沉积非晶硅薄膜,然后再进行热退火,使非晶硅薄膜再结晶以获得多晶硅薄膜,其主要特点是非晶硅发生晶化的温度低于其熔融后结晶的温度。陈城钊等<sup>[50]</sup>先用PCVD法沉积非晶硅薄膜,再用固相晶化法对其退火以获得多晶硅薄膜(退火温度700~800℃),研究结果表明晶粒平均尺寸随着退火温度的降低、掺杂浓度的降低、薄膜厚度的增加而增加,并且退火后多晶硅薄膜暗电导率提高了2~4个数量级。

##### 4.2.2 区熔再结晶法(ZMR)<sup>[51]</sup>

该法需将非晶硅整体加热至一定温度(约1100℃),再用一束很窄的源能量在非晶硅表面来回移动,加热局部非晶硅使其熔化再结晶。区熔再结晶法可以得到厘米级的晶粒,并且在一定的技术处理和工艺条件的配合下可以得到比较一致的晶粒取向。加热的源能量主要有激光、条状灯丝、电子束以及射频等,其中激光加热再结晶法是用得最普遍最成熟的。激光再结晶法(LMC)<sup>[52,53]</sup>采用激光束的高温将非晶硅薄膜熔化再结晶,从而得到多晶硅薄膜,但难以制备大面积薄膜,而且晶粒尺寸和均匀性也难以控制。

##### 4.2.3 金属诱导结晶法(MIC)<sup>[54]</sup>

该法是把非晶硅薄膜沉积在薄金属层衬底上,或者在非晶硅薄膜上沉积一层薄金属层,或者将金属离子注入到非晶硅薄膜中,然后置于保护气体(如Ar)中加热退火,非晶硅薄膜便会再结晶形成多晶硅薄膜。最常用的金属是铝,铝诱导晶化法制备多晶硅薄膜的温度只需560℃,但致命的缺点是金属会污染多晶硅薄膜。

最近,Pereira L等<sup>[55]</sup>先用LPCVD法在玻璃衬底上沉积150nm的非晶硅薄膜,再在其上沉积不同厚度的Al和Ni薄膜,并在衬底温度为500℃,反应气压为6.65Pa的Ar中退火再结晶以获得多晶硅薄膜,实验结果表明,Ni比Al诱导结晶出的多晶硅薄膜中晶体含量高,达到84%。

#### 4.3 液相外延法(LPE)

该法就是先通过高温将硅熔融在母液里,然后降低温度使硅析出形成多晶硅薄膜,液相外延法可通过控制生长条件来直接得到具有减反射绒面结构的多晶硅薄膜<sup>[56]</sup>。这种方法沉积的多晶硅薄膜质量不高,也没有太大进展,但能制备出光电转化率高达23.17%的GaAs太阳能电池<sup>[57]</sup>。

#### 4.4 溅射沉积法

该法是一种重要的制备薄膜的物理方法,要求真空度

高,衬底温度相对较低。该方法沉积硅薄膜速度快,杂质含量低等优点,但沉积的薄膜不均匀,致密度不高,且一般为非晶态<sup>[58,59]</sup>。刘晓为等<sup>[60]</sup>用磁控溅射方法直接制备的硅薄膜几乎没有形成晶粒,而且掺杂后不导电,后再对该硅薄膜高温退火再结晶得到多晶硅薄膜,实验结果表明1080℃退火时电阻率最小。Yang等人<sup>[61]</sup>先用溅射法制得的含氢的微晶硅作为籽晶层,而后再用磁控溅射的方法沉积多晶硅薄膜。

#### 4.5 等离子喷涂法(PSM)

该法是以99.9999%晶体硅为原材料,Ar为载体,用直流射频(DC-RF)等离子体进行喷涂。硅粉在高温等离子体中加热熔化,熔化的粒子沉积在由加热器加热的衬底上形成薄膜,衬底温度保持在1200℃左右<sup>[62]</sup>。

### 5 多晶硅薄膜太阳能电池的前景展望

多晶硅薄膜太阳能电池是兼具晶体硅太阳能电池的高光电转换效率、稳定长寿和非晶硅太阳能电池的材料制备工艺简单、成本低,并且无污染,可大面积生长等优点于一身的新一代太阳能电池,具有广阔的发展前景。

多晶硅薄膜的晶粒尺寸、晶粒形态、晶粒晶界、膜厚以及基体中有害杂质的含量及分布方式严重地影响着太阳光的吸收率和载流子的复合率,从而影响着光电转化效率,这也是多晶硅薄膜太阳能电池的性能仍落后于晶体硅太阳能电池的主要原因。

目前,几乎所有制备晶体硅高效太阳能电池的技术均已用在制备多晶硅薄膜太阳能电池的工艺上,甚至还包括一些制备集成电路的方法和工艺,如制造绒面、减反射膜和高反射背电极来增加太阳光的透过率;衬底与薄膜材料之间增加一介质层以阻挡衬底杂质向硅薄膜材料的扩散以及绝缘;在多晶硅薄膜太阳能电池的研制中,通常将硅材料暴露于氢等离子体中钝化以防止其氧化;丝网印刷技术制备细金属栅电极;表面和体钝化以降低薄膜晶粒晶界和晶格错位缺陷等等。

随着科技的发展与提高,通过改变实验方法和实验参数来获得大颗粒、取向规则、低杂质、低空隙率、少晶粒晶界、均匀且厚度可控的高质量多晶硅薄膜,从而进一步提高多晶硅薄膜太阳能电池光电转化效率,并进一步降低其生产成本,使得多晶硅薄膜太阳能电池的发电能力及成本能够与常规能源相竞争,进而取代之。

#### 参考文献

- [1]王远,吴麟章,罗雪莲,等.一种在室温下制备柔性太阳能电池的新方法[J].武汉科技学院学报,2005,18(8):9~11
- [2]魏奎先,戴永年,马文会,等.太阳能电池硅转换材料现状及发展趋势[J].轻金属,2006,(2):52~56
- [3]Zhao J, Wang A, Green M A. 24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrate [C]. International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 1999,557

- [4] Rohatgi A, Narasimha S, Kamra S, et al. Record high 18.6% efficient solar cell on HEM multi-crystalline material [C]. Photovoltaic Specialists Conference, 1996, 741 ~ 744
- [5] Zhao J H, Wang A H, Green M A, et al. A 19.8% efficient honeycomb multi-crystalline silicon solar cell with improved light trapping [J]. Electron Devices, 1999, 46(10): 1978 ~ 1983
- [6] 张晓丹, 张发荣, 赵颖, 等. 1 nm/s 高速率微晶硅薄膜的制备及其在太阳能电池中的应用 [J]. 半导体学报, 2007, 28(2): 209 ~ 212
- [7] 沐俊应, 徐娟, 梁氏秋水, 等. 有机薄膜太阳能电池的研究进展 [J]. 电子工艺技术, 2007, 28(2): 93 ~ 96
- [8] 苏孙庆. 多晶硅薄膜太阳能电池的研究进展 [J]. 技术物理教学, 2007, 15(2): 45 ~ 47
- [9] 钟文建. 多晶硅太阳能电池工艺技术探讨及应用前景分析 [J]. 陶瓷科学与技术, 2005, 39(5): 36 ~ 40
- [10] Mai Y, Klein S, Wolff J, et al. Microcrystalline silicon solar cells deposited at high rates by combination of VHF-PECVD and high working pressure [C]. 19th EUPVSEC, 2004, Paris, France
- [11] 陈诺夫, 白一鸣. 聚光光伏系统 [J]. 物理, 2007, 36(11): 862 ~ 868
- [12] Green M A, Emery K, King D L, et al. Solar cell efficiency tables [J]. Research and application, 2003, 11(5): 347 ~ 352
- [13] Mc C R. First international conference on solar electric concentrators [C]. 29th IEEE photovoltaic specialists conference, New Orleans, 2002: 1737 ~ 1741
- [14] 张榕, 周海平, 陈红. 碲化镉薄膜太阳能电池及其溅射制备 [J]. 材料导报, 2006, 20(11): 47 ~ 50
- [15] Romeo N, Bosio A. The role of CdS preparation method in the performance of CdTe/CdS thin film solar cell [C]. Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003, 1, 469
- [16] Tsuji M, Aramoto T, Ohyama H, et al. Characterization of CdS thin-film in high efficient CdS/CdTe solar cells [J]. J Appl Phys, 2000, 39: 3902
- [17] 葛艳辉, 史伟民, 魏光普, 等. 电沉积法制备 CdS 薄膜及其性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2006, 35(4): 867 ~ 869
- [18] 李长健, 谢小健, 朱践知, 等. CIS/CdS 太阳能电池的研制 [J]. 南开大学学报, 1995, 28(4): 54 ~ 58
- [19] 郭爱萍, 孙强. 基于 GaAs 半导体太阳能电池技术发展概况 [J]. 电源技术, 2007, 31(9): 757 ~ 758
- [20] Contreras M A, Rmanathan K, Abushama J, et al. Diode characteristics in state-of-the-art ZnO/CdS/Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)Se<sub>2</sub> solar cells [J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2005, (13): 209 ~ 216
- [21] Ward J S, Rmanathan K, Hasoon F S, et al. A 21.5% efficient Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> thin-film concentrator solar cell [J]. Research and Applications, 2002, 10(1): 41 ~ 46
- [22] 沈辉, 陈菊芳, 郑广富. 铜铟硒薄膜太阳能电池的研究进展 [J]. 电源技术, 2007, 31(10): 767 ~ 771
- [23] 陈云霞, 郝江波, 何鑫. TiO<sub>2</sub> 基太阳能电池研究进展 [J]. 陶瓷学报, 2007, 28(1): 73 ~ 78
- [24] Jenny N. Organic photovoltaic films [J]. Materials today, 2002, 5: 20 ~ 27
- [25] Hummelen J C, Shaheen S E, Brabec C J, et al. 2.5% efficient organic plastic solar cells [J]. Applied Physics Letters, 2001, 78: 841 ~ 843
- [26] O'Regan B, Gratzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films [J]. Nature, 1991, 353: 737 ~ 739
- [27] Gratzel M. The advent of mesoscopic injection solar cells [J]. Prog Phot Appl, 2006, 14: 429 ~ 446
- [28] 黄子乾, 李肖, 潘彬, 等. 用于 GaInP/GaAs 双结叠层太阳能电池的 MOVPE 外延材料 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(5): 433 ~ 435
- [29] Pertness K A, Olson J M. 29.5% efficient GaInP/GaAs tandem solar cells [J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(8): 989 ~ 991
- [30] 于敏丽, 孟红秀. GaAs 叠层太阳能电池技术的研究现状及发展趋势 [J]. 邢台职业技术学院学报, 2007, 24(3): 41 ~ 43
- [31] Noufi R, Young D, Coutts T J, et al. Toward a 25%-efficient polycrystalline thin-film tandem solar cell [C]. Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 11 ~ 18 May 2003, Osaka, Japan, 2003, 1: 12 ~ 44
- [32] Hasoon F S, Al-Jassim M, Sartzlander A, et al. The morphology of CdS thin films deposited on SnO<sub>2</sub>-coated glass substrates [J]. IEEE, 1997, 535
- [33] 沃银花. CdTe/CdS 太阳能电池材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2005, 19(4): 31 ~ 34
- [34] 李愿杰, 唐茜, 黎兵, 等. CdS/CdTe 叠层太阳能电池的制备及其性能 [J]. 半导体学报, 2007, 28(5): 722 ~ 725
- [35] Yamamoto K, Yoshimi M, Tawada Y, et al. Thin film Si solar cell fabricated at low temperature [J]. J Non-Cryst Solids, 2000, 266 ~ 269: 1082
- [36] 林鸿生, 马雷. a-Si/CIS 叠层太阳能电池的光导性能衰退和稳定性分析 [J]. 真空科学与技术, 2002, 22(1): 33 ~ 36
- [37] 薛俊明, 麦耀华, 赵颖, 等. 薄膜非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池的研究 [J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 166 ~ 169
- [38] 朱锋, 赵颖, 魏长春, 等. 薄膜非晶/微晶叠层电池中 NP 隧穿结的影响 [J]. 人工晶体学报, 2006, 35(1): 81 ~ 84
- [39] Jeffrey Y, Arindam B. Correlation of component cells with high efficiency amorphous silicon alloy triple-junction solar cells and modules [C]. World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversions, 1998, 387 ~ 390
- [40] 王红成, 林璇英, 曾晓华. a-Si:H 叠层薄膜太阳能电池的最佳设计的计算机模拟 [J]. 功能材料, 2003, 34(6): 673 ~ 675
- [41] 王文静. 多晶硅薄膜太阳能电池 [J]. 太阳能光电, 2005, 98(3): 9 ~ 11
- [42] Kielibaa T, Schober B, Obwald D, et al. Crystalline silicon thin-film solar cells on ZrSiO<sub>4</sub> ceramic substrates [J]. Solar Energy Material & Solar Cells, 2002, 74: 261 ~ 266
- [43] Bergman R B, Werner J H. The future of crystalline silicon films on foreign substrates [J]. Thin Solid Films, 2002, 403 ~ 404: 162 ~ 169
- [44] Takenhara T, Harshbarger W R, Tsai C C, et al. PECVD films for low-temperature poly-si TFT LCD application [J]. Journal of the SLD, 2001, 9(1): 59 ~ 60
- [45] 邱春文, 石旺舟, 黄羽中. PECVD 法低温沉积多晶硅薄膜的研究 [J]. 液晶与显示, 2003, 18(3): 201 ~ 204
- [46] 王丽春, 张贵锋, 侯晓多, 等. 热丝法低温制备多晶硅薄膜微结构的研究 [J]. 人工晶体学报, 2007, 36(6): 1372 ~ 1376
- [47] 马蕾, 简红彬, 康建波, 等. 多晶硅薄膜制备技术的研究进展 [J]. 河北大学学报, 2005, 25(1): 97 ~ 102
- [48] Kakkad R, Smith J, Lau W S, et al. Crystallized Si films by low-temperature rapid thermal annealing of amorphous silicon [J]. J Appl

- Phys, 1989, 65(5): 2069 ~ 2072
- [49] Liu G, Fonash S J. Selective area crystallization of amorphous silicon films by low temperature rapid thermal annealing[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(7): 660 ~ 662
- [50] 陈城钊, 方健文, 林璇英.  $\alpha$ -Si:H 薄膜固相晶化法制备多晶硅薄膜[J]. 浙江师范大学学报, 2002, 25(3): 246 ~ 249
- [51] Kieliba T, Bau S, Schober R, et al. Crystalline silicon thin-film solar cells on  $ZrSiO_4$  ceramic substrates[J]. Solar Energy Material & Solar Cells, 2002, 74(1-4): 261 ~ 266
- [52] Jeon J H, Lee M C, Park K C, et al. New excimer laser recrystallization of poly-Si for effective grain growth and grain boundary arrangement[J]. Jpn Soc of Appl Phys, 2000, 39(4B): 2012 ~ 2020
- [53] Christiansen S, Lengsfeld P, Krinke J, et al. Nature of grain boundaries in laser crystallized polycrystalline silicon thin films[J]. J Appl Phys, 2001, 89(10): 5345 ~ 5348
- [54] 饶瑞, 徐重阳, 孙国才, 等. 铝诱导晶化法低温制备多晶硅薄膜[J]. 无机材料学报, 2001, 16(4): 688 ~ 692
- [55] Pereira L, Aguas H, Artins R M, et al. Polycrystalline silicon obtained by metal induced crystallization using different metals[J]. Thin Solid Films, 2004, 451-452: 334 ~ 339
- [56] Qian Y B, Shi W M, Chen P F, et al. Silicon film fabrication by liquid phase epitaxy at low temperature[J]. Semiconductor Photonics and Technology, 1998, 4(1): 18 ~ 24
- [57] 李标, 向贤碧, 许颖, 等. 用回熔再生长 LPE 工艺制备高效 Al-GaAs/GaAs 太阳能电池[J]. 固体电子学研究与进展, 1996, 16(2): 103 ~ 109
- [58] Jung M J, Jung Y M, Leonid R, et al. Polycrystalline Si thin film growth on glass using pulsed d. c. magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2002, 420 ~ 421(10): 429 ~ 432
- [59] 季旭东. 低温多晶硅薄膜晶体管(p-Si TFT)制作新技术[J]. 光电技术, 2003, 44(1): 49 ~ 53
- [60] 刘晓为, 宋明浩, 王喜莲, 等. 多晶硅薄膜制备方法与压阻特性的研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(4): 18 ~ 20
- [61] Yang Y H, Abelson J R. Growth of polycrystalline silicon at 470 °C by magnetron sputtering onto a sputtered  $\mu$ c-hydrogenated silicon seed layer[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(10): 3623 ~ 3630
- [62] 秦桂红, 严彪, 唐人剑. 多晶硅薄膜太阳能电池的研制及发展趋势[J]. 上海有色金属, 2004, 25(1): 38 ~ 42

#### 作者简介

吴斌(WU Bin, 1982-), 男, 湖北黄冈市人, 硕士研究生(现就读于武汉工程大学), 从事太阳能电池的研究。

汪建华(WANG Jianhua, 1955-), 男, 湖北武汉市人, 中科院博士、教授、博士生导师, 主要从事微波等离子体合成新材料的研究。

(责任编辑: 房俊民)