

卧式 PECVD 在太阳能行业的应用

郑建宇, 盛金龙, 张上华

(北京七星华创电子股份有限公司, 北京 100016)

摘要:介绍了一种用于太阳能行业淀积氮化硅薄膜的等离子增强化学气相淀积设备,叙述了该设备的结构组成,并重点阐述了工艺原理及关键技术的改进。

关键词:PECVD;氮化硅薄膜;工艺;改进

中图分类号:TN305

文献标识码:A

文章编号:1004-4507(2007)09-0016-04

The Application of Horizontal Heated Pecvd System in Solar Cells

ZHENG Jian-yu, SHENG Jin-long, ZHANG Shang-hua

(Beijing SevenStar Huachuang Electronic Co.Ltd, Beijing 100016)

Abstract: A kind of PECVD equipment for Si_3N_4 film growth in solar cells manufacture is introduced. Describes the configuration of the equipment, the improvement of the recipe.

Keywords: PECVD; Si_3N_4 film; recipe; improvement.

1 引言

随着煤炭、石油等传统能源日趋枯竭,世界各国正在积极发展可再生能源。中国 2006 年 1 月 1 日起正式实施了《中华人民共和国可再生能源法》。在可再生能源中,太阳能取之不尽,清洁安全,已成为最具可持续发展的可再生能源技术之一。随着太阳能光伏发电技术的日趋成熟,目前中国已经是国际光伏发电应用产品主要生产基地。2006 年我国太阳能电池生产能力已超过 800 MW。专家预测中国光伏电池的年生产目标到 2010 年达到 2 000 MW 以上。这样必然带动太阳能电池制造设备需求的急剧增加。

由于 PECVD(等离子增强化学汽相淀积)设备淀积的氮化硅薄膜,同时起到减反射膜和钝化的作用,可以极大地提高电池片转换效率,降低生产成本。是太阳能生产线中最为重要的设备之一。本文介绍的北京七星华创电子股份有限公司专用于太阳能行业的 PECVD 设备,其性能优良、自动化程度较高、生产的薄膜均匀性片内优于 $\pm 3\%$ 、片间、批间均优于 $\pm 5\%$,达到了同类国际设备的先进水平。

2 主要技术指标与结构

2.1 主要技术指标

(1)设备工作指标:工作温度范围:150~600 °C

收稿日期:2007-07-23

作者简介:郑建宇,男,本科,工程师,自 2001 年一直从事微电子及太阳能设备的设计研发工作,具有丰富的生产线工艺调试经验。

恒温区精度及长度: $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}/900\text{ mm}$

温度梯度: $0\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}/900\text{ mm}$ 可调

系统极限真空度: 优于 1 Pa

工作压力范围: $50\sim 300\text{ Pa}$ 闭环控制

(2) 成膜厚度均匀性指标: 片内 $\pm 3\%$; 片间 $\pm 5\%$; 批间 $\pm 5\%$

2.2 设备的结构设计

本课题所涉及的 PECVD 设备结构主要包括以下几个方面: 炉体机箱、炉门机构、推拉舟机架、电气控制柜、气路系统和真空系统、反应腔室、RF 电源、工作台、旋转炉门。结构见图 1。

(1) 炉体机箱。炉体机箱的顶部是风冷热交换器, 中部是处理硅片的 2 个加热炉体, 下部是 2 套功率调节部件和变压器, 炉体三段加热, 三点控温。功率调节方便, 触发可靠。

(2) 炉门机构。炉门机构既是起到反应室与大气隔离作用, 又是装片舟、射频引入的载体。它由门法兰、支撑轴、舟托架和不锈钢波纹管组成。

(3) 推拉舟机架。推拉舟机架是支撑两管悬臂推拉舟的能够自动装载舟片进入反应室的装置。该装置上装有前、后、极限位传感器。主要由步进电机、斜滚式驱动机构、直线轴承、圆柱导轨及调整机构组成, 步进电机驱动器采用细分电路, 保证送料

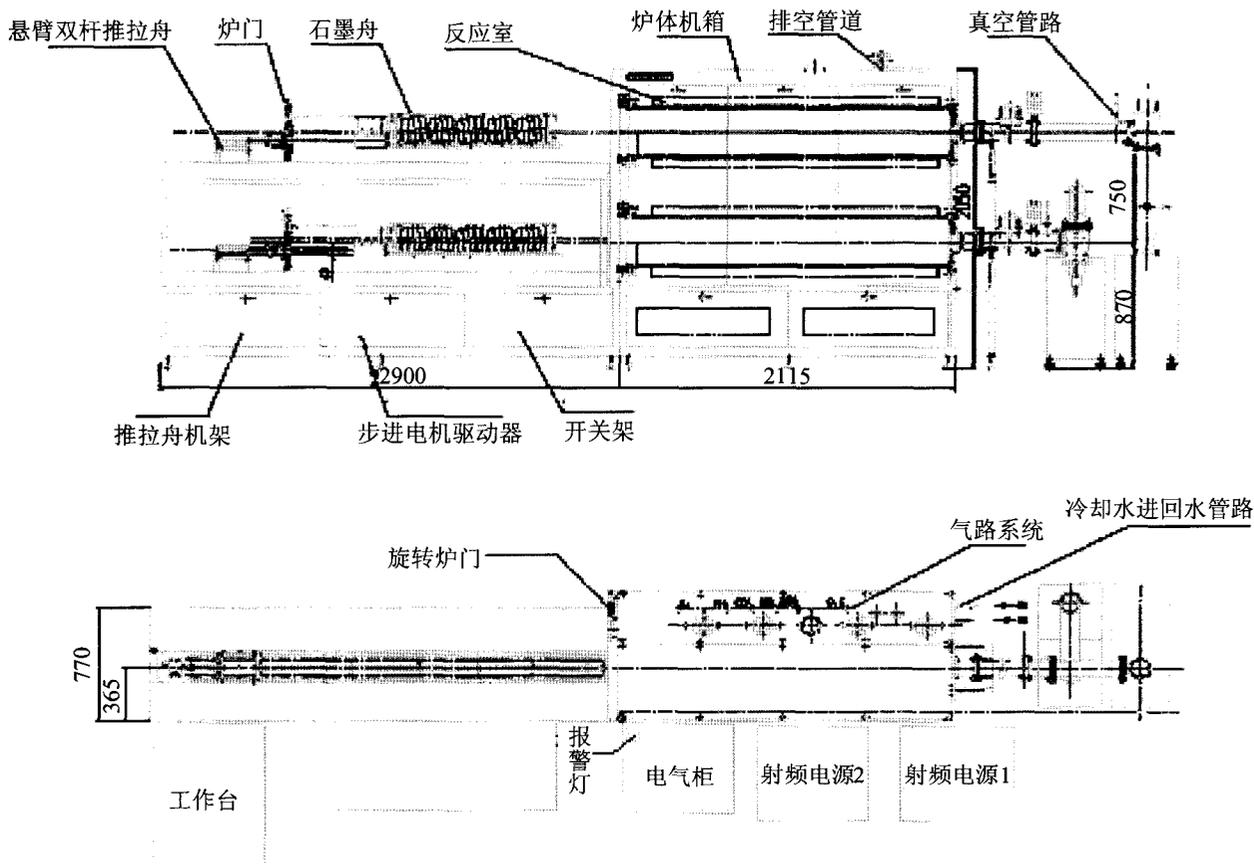


图 1 设备结构

装置平稳运行。推舟器的行程用两端的接近开关控制, 调整机构用来夹持装有石墨舟的支撑机构并能调整其俯仰、偏斜角度, 以确保悬臂舟在反应室的正确位置。

(4) 控制系统。本系统采用 PC 总线工业控制机作为控制主机, 使用防磁、防震、抗干扰能力强适用于恶劣工业环境的工作站。软件运行于 Windows2000 环境下, 能对炉温、流量、阀门、压力、干

泵、射频等进行自动控制,管理并记录全部工艺时序,界面美观、友好,易操作。每个炉管均有一套独立的控制系统。

(5)气路系统和真空系统。该套设备采用进口的闭环压力控制系统,该系统由压力控制器、压力传感器、调压蝶阀组成,具有控制精度高、反应速度快的优点。尤其重要的是该压力控制系统可消除各工艺气体流量参数与压力参数间的相互影响,便于迅速找到最佳工艺参数。

(6)反应室。反应室是用来淀积 Si_3N_4 薄膜的工作室,它由进气法兰、固定法兰、石英反应管和后法兰等组成。石英反应管通过外圆密封固定在进气法兰和后法兰上,工艺气体和 RF 电源引入装在进气法兰上,整个反应室通过后法兰和固定法兰被连接在炉体柜的骨架上。

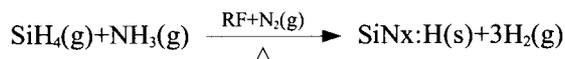
(7)RF 电源。采用具有脉冲调制功能的射频电源,400 kHz、可调;匹配器安装在射频电源上,靠近反应室入口,这有利于减小对其它设备的干扰,也可减小射频的衰减。

(8)工作台。是装片和取片的装置,当把石墨舟放在工作台上时,可以向前、后两侧倾斜一定的角度,可以方便快速的装、取片,节省工作时间。

(9)旋转炉门。是在工艺结束后用于密闭反应室的装置,防止炉体温度的散失。

3 工艺原理介绍

利用 PECVD 淀积氮化硅的反应是一个非化学计量组分的反应方程式,即:



在这里,硅烷和氨气的反应是在加热到一定温度的等离子体中发生的。薄膜的淀积速率和成膜质量与射频源频率及功率、气体流量及比例、反应温度及温度梯度和反应室压力有关。工艺的参数变化和组合多,每一个参数的变化都会直接影响到最后的结果。因此,必须通过大量实验找出一个最佳工艺配合,以达到用较短时间生长出符合太阳能电池

片要求的高质量氮化硅薄膜的目的。

首先是反应温度和温度梯度。PECVD 的一大优点就在于可以在较低的温度下利用射频激活气体,生成等离子体,发生反应生成所需薄膜。这样,既避免了高温可能对已完成工艺的破坏,又能保证生长的薄膜的特性和质量符合太阳能电池的要求。而氮化硅薄膜的淀积速率对温度的变化并不是十分敏感,因此淀积工艺的温度梯度可以很小,使得薄膜应力的差距很小,对太阳能电池片有益无害。通常选取在 400~450 °C 作为氮化硅薄膜的生长温度。

其次是反应室内的压力条件。淀积时的压力对薄膜淀积速率、薄膜致密性以及薄膜的均匀性有较大的影响,而对薄膜的折射率影响不大。由于采用的射频源的特性所决定,当反应室内压力低于一定值,无法在硅片上生长薄膜。通过实验,我们发现当压力在一定范围内变化时,压力越小,淀积速率越小,薄膜均匀性也越好。但为了达到兼顾淀积速率和薄膜致密性和均匀性的目的,必须选取一个适中的压力条件。在实际应用中,一般选取 106.4~266.0 Pa 作为反应压力。这个压力条件下沉积的氮化硅薄膜,片内、片间、批间均匀性以及薄膜的致密性都达到了太阳能电池行业对氮化硅薄膜的要求,而且淀积速率也得到保证,进而保证了工业生产中的产量要求。

2 种参与反应的气体 SiH_4 和 NH_3 的比例直接决定了生长的氮化硅薄膜中的硅氮比,这一比例是影响氮化硅薄膜折射率的最主要因素并同时也影响到薄膜的致密性。根据太阳能电池制造工艺对氮化硅减反射膜的要求,其折射率应介于 1.9~2.1 之间。通过实验知道,当 $q_v(\text{SiH}_4):q_v(\text{NH}_3)$ 介于 1:5 到 1:15 之间时,薄膜特性最佳,折射率大概在 2.0 左右,致密性也达到要求。而由于应用于太阳能电池行业的 PECVD 的工艺与应用于半导体行业的 PECVD 相比,较大的不同在于工艺时间短、产量大,因此所使用的气流量很大,相应的流量计也必须增大量程。

射频的工作方式、射频平均输出功率和频率以及脉冲输出占空比对氮化硅薄膜的生长工艺有着至关重要的影响,若是各参数选择不对,会生长出

均匀性和质量都非常不理想的氮化硅薄膜。射频源有 2 种发生方式,脉冲式和连续式。使用连续式,无论怎样改变参数都无法生长出均匀的薄膜。改用脉冲式后,就涉及到了脉冲输出占空比的调整和频率选择的问题。必须要找出一个合适的占空比和频率,才能生长出均匀而且特性好的氮化硅薄膜。另外就是射频平均输出功率的选择。在一定的负载下,淀积速率与射频平均输出功率呈线性关系。当负载片逐渐增加,平均输出功率也必须相应增大,否则,射频源不能产生辉光放电而无法生长薄膜。经过大量试验发现,当脉冲输出占空比 $t_{\text{off}}:t_{\text{on}}$ 小于 5:1 时,生长出的氮化硅薄膜均匀性变差;当 $t_{\text{off}}:t_{\text{on}}$ 大于 20:1 时,射频源平均输出功率低,生长时间长,不利于缩短工艺时间,提高产量。脉冲输出占空比 $t_{\text{off}}:t_{\text{on}}$ 选取在 5:1 到 20:1 之间时,生长的氮化硅薄膜特性最佳,而且工艺时间较短,符合太阳能电池生产的质量和产量要求。

综上所述,我们通过大量的实验和对实验数据的分析,最终找出了一套适合于该设备的工艺范围条件:温度:400~450 °C,压力:106.4~266.0 Pa, q_v (SiH_4): q_v (NH_3) 介于 1:5 到 1:15 之间,脉冲输出占空比 $t_{\text{off}}:t_{\text{on}}$ 选取在 18:1。在这一工艺条件下,利用我们的 PECVD 淀积的氮化硅薄在均匀性、质量以及产量上都达到了太阳能电池生产线的要求,并已经应用于大规模太阳能电池生产线,得到了客户的好评。

4 关键技术的改进

由于 PECVD 设备在太阳能产业同半导体行业的差异,即:净化程度要求不高,但产量巨大,气体消耗量大,工艺时间很短。所以我们的 PECVD 在原来半导体应用设计基础上要对真空系统、温控系统、压力系统及净化结构都要加以改进,并将原来的软件优化,见图 2、图 3。

其太阳能净化程度要求不高,但产量巨大,我们取消原有净化层流设计改成双面操作,既便于装取片又便于观察反应腔室内起辉情况。PECVD 设备温控精度要求不高,且温度梯度不大,依此特性重新设计控温系统;对于 PECVD 工艺气量大,调

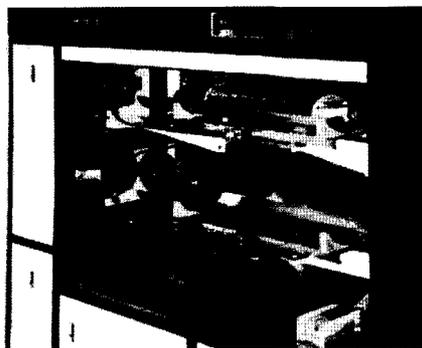


图 2 原半导体 PECVD 照片

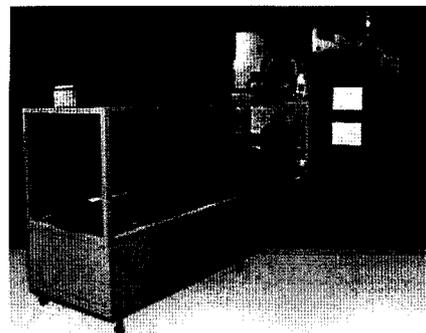


图 3 新太阳能 PECVD 照片

压要稳定迅速的特性,我们重新试验,选择了新的更加稳定的压控系统,同时对气路系统的洁净度和可靠性也进行了改进。

(1) 脉冲等离子体源的稳定获得和控制

对于大产量,短工艺时间要求,对应的射频源输出功率要相应增大。为了获得有良好特性的氮化硅薄膜,又要求射频源为脉冲输出形式。中低频率大功率的脉冲射频源对于射频厂家中科院微电子中心来说也是第一次尝试,经多方查阅资料,参考进口设备参数,并通过与客户的协作和我们不断的摸索,提出了一套比较好的射频参数方案,开发出一套较为理想的射频源。同时经过长时间工艺试验,我们也找到一些射频源需要改进的地方,大大提高了射频源的工作稳定性和可靠性,并解决了大功率射频源的射频干扰问题。

(2) 石墨舟结构的合理设计

石墨舟的石墨材料选择,电极间距的大小对工艺影响很大。同时石墨舟片上卡点的设计对硅片整

(下转第 38 页)

中的支持和帮助;感谢清华大学磨擦学重点实验室的杨文言老师在 SEM 和 EDAX 测试方面的帮助。

参考文献:

- [1] Chin C. Lee, Ricky W. Chuang. Fluxless Non-eutectic Joints Fabricated Using Gold-Tin Multilayer Composite [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(2):416-422.
- [2] Woonbae Kim, Qian Wang, Junsik Hwang and etc.. A Low Temperature, Hermetic Wafer Level Packaging Method for RF MEMS Switch [C]. . Proceedings. of the 55th Electronic Components and Technology Conference, 2005, 1103 - 1108.
- [3] S.K.Sen, A.Ghorai and A.K.Bandyopadhyay. Interfacial reactions in bimetallic Ag-Sn thin film couples [J]. Thin Solid Films, 1987, 155:243-253.
- [4] Yi-Chia Chen, Chin C. Lee. Multilayer Tin-Silver Composite Solders Deposited in High Vacuum[C]. San Diego, CA: Proc. International Electronics Packaging conference, 1995, 258-264.
- [5] T. Laurila, V. Vuorinen, J.K. Kivilahti. Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 49: 1-60.
- [6] J. Shen, Y.C. Liu, H.X. Gao, C. Wei, and Y.Q. Yang. Formation of Bulk Ag₃Sn Intermetallic Compounds in Sn-Ag Lead-Free Solders in Solidification [J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(12).
- [7] J. Gorlich and G Schmitz. On the mechanism of binary Cu/Sn solder reaction [J]. Applied Physics Letters, 2005 (86): 1-3.
- [8] XiaoGang li, Jian Cai, YoonChul Sohn, Qian Wang and Woonbae Kim. Ag-Sn Fluxless Wafer Bonding Technology[C]. HongKong:8th EMAP, 2006.

(上接第 19 页)

体成膜质量及转换效率也影响很大,如倒片、碎片且表面成膜质量不好,经多次试验,对石墨舟片和卡点进行多次改进,在客户处终于摸索出比较满意的卡点结构,见图 4。

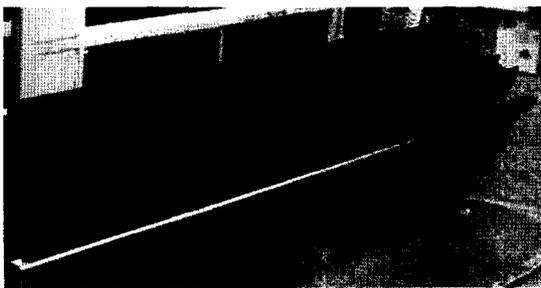


图 4 石墨舟图片

5 设备的问题与不足

(1) 生产产能需要提高,这样在性价比上更具竞争性。

(2) 装取片不方便,费时,应配套自动上下料机构。

(3) 改进工艺甚至需要改动设备结构,学习进口设备的优点,提高反应温度,提高成膜的致密性

(4) 使设备更符合 SEMI 标准,设备 MTBF 更长设备能更稳定的在大规模太阳能电池生产线上运行。

(5) 继续提高射频稳定性并开发各种功率的自动匹射手频源。

6 结语

北京七星华创电子股份有限公司研制的 PECVD 设备经过不断的试验改进最终满足了太阳能电池生产线的各项要求,在国内用户中得到很好的口碑,树立起了良好的企业形象。并可以解除国外技术壁垒,树立本土品牌,对提升我国太阳能行业的装备制造制造业具极大的推动作用,能够降低我国太阳能产业对进口设备的依赖,大大降低太阳能电池片的生产成本,维护成本,极大地增强行业的国际市场竞争能力。