

TCO 镀膜玻璃生产线的加热冷却系统设计

上海北玻光伏事业部 费红财

摘 要: 本文简述 TCO 镀膜玻璃生产线加热冷却系统的设计和制造问题, 保证大板玻璃表面加热均匀, 加热器排布时考虑边缘和中部集中效应, 将加热器设计成模块化加热器, 通过 PLC 局部控温调节加热功率实现整板温度均匀性。为充分利用辐射加热和防热量损失, 研究在加热器前后各布置均热瓦楞板和 4 层镜面抛光反射板。为增加冷却面积, 维持腔体焊缝、密封圈等关键部位的耐温极限, 采取冷却铜管缠绕布置在铝板上冷却, 将 20% 散失热量及时带走, 始终维持温度平衡。由于玻璃基片温度对镀制 AZO 薄膜技术指标, 如透光率、电阻、膜层致密性及晶相等有决定影响, 所以加热冷却系统的设计和制造尤为重要, 设计中需考虑加热器功率、升温时间、热量利用率及冷却器冷量计算、加热器和冷却器布置等问题。

1 引言

TCO(Transparent Conducting Oxide)玻璃是透明导电氧化物镀膜玻璃的缩略语, TCO 玻璃有很多应用, 主要用来制作薄膜太阳能电池的透明前电极基板, 也可用来制造液晶显示板、阳光节能玻璃等。TCO 玻璃有多种制备方法, 本文作者研究的 TCO 玻璃是以氧化锌掺铝(AZO)薄膜作为透明导电氧化物薄膜材料, 利用磁控溅射等方法在一定沉积温度平板玻璃表面均匀镀上一层 AZO 薄膜而制成的。

由于沉积温度是 TCO 玻璃镀膜最重要的工艺参数之一, 不仅影响 TCO 薄膜结构, 而且对 TCO 薄膜的光学性能和电学性能的影响也是显著的。温度对光学性能和电学性能的影响源于薄膜结晶状态的改善, 然而温度的升高是有一个临界点, 超过临界点值后, 导电性、透光率则随温度的升高而下降, 所以加热器设计时需结合玻璃基片最佳的沉积温度范围设计, 否则会出现加热器加热功率不足导致设备性能差, 或加热器加热功率过高带来巨大的成本浪费。所以 TCO 玻璃镀膜生产线的加热冷却系统非常重要, 是决定该生产线成败的关键因素之一。加热冷却系统质量不好会造成玻璃表面加热不均匀、热量利用率低、热变形大、漏电等问题, 并会引起玻璃产量少、设备运营成本高等问题。

本文作者主要研究了 TCO(AZO)透明导电薄膜玻璃镀膜生产线的加热冷却系统的设计和制造问题。

2 加热冷却系统的设计

加热冷却系统的设计应满足磁控溅射法镀制 AZO 氧化物薄膜所需最佳沉积工艺温度范围, 主要包括加热器、冷却器材料选型、加热冷却设计计算、加热器、冷却器布置和固定等。

加热冷却系统的设计要求: (1)TCO 玻璃镀膜生产线是大面积自动化连续生产线, 对加热冷却系统稳定可靠性、运行寿命等要求高, 否则会因加热器、冷却器维护耽误设备运行, 损失巨大; (2)生产过程中根据工艺需要须随时对加热器各模块加热功率作相应调整, 且在上位机能实时监控温度变化; (3)腔体焊缝、密封面处密封元件、非加热区域传动部件等要求温度低、变形小, 另从安全角度腔体侧壁温度控制在 60℃以下, 否则有烫伤隐患; (4)高真空镀膜室要求加热冷却系统材料表面放气率小、气密性好、无气体死角等不利于抽真空的因素; (5)由于生产中玻璃可能因加热不均匀变形破碎后不会对加热冷却系统造成破坏或影响其稳定性; (6)对加热器冷端、热电偶和冷却器铜管接头处焊缝及与腔体连接法兰面漏气率要求不大于 6×10^{-8} mbar.L/s, 对加热器温度偏差设计在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 温度范围内, 否则对温度控制不准。

加热冷却系统的设计特点: (1)保证大板玻璃加热均匀, 设计加热器排布时考虑边缘和中部集中效应, 所以加热器设计成模块化便于局部加热功率精确控制与调整, 即取玻璃表面上不同点测量温度, 通过

调整个别加热器功率实现大板玻璃表面温度一致;(2)为充分利用加热器辐射加热,加热器前面安装有瓦楞板作均热板,增大辐射面积,即加热器先加热瓦楞板再通过均热板辐射玻璃,这样保证玻璃表面加热均匀不会变形破碎;为防止加热器热量损失,同时减轻冷却器冷却压力,加热器与冷却器间安装4层镜面抛光反射板,将热量反射回加热区域供玻璃加热用,按每层能反射挡回20%热量计算,总共将近80%热量可二次利用;(3)在高真空镀膜室里只有辐射和传导两种加热方式,玻璃主要靠辊道传导和加热器均热板辐射加热,所以玻璃上下方加热器布置时与玻璃距离非常重要,但要考虑辊道间距、加热器本身热变形,计算确定最佳的布置距离;(4)由于玻璃上下表面加热不均匀导致玻璃翘曲变形应力集中或破碎,所以在传输辊道间、阴极挡板下方及分子泵与隔板间均布置小段加热器以补偿因中断部分降温明显位置,不至于温差太大造成玻璃变形破碎或产生退火应力;(5)设计缓冲加热室时考虑到玻璃从进口室由常温快速升温至260℃,特将该腔体设计成玻璃往复摆动加热模式,在生产节拍允许前提下可以减少加热器布置;(6)为了将加热室里耐温低的关键元件降温冷却,如密封圈、磁流体、传动部件及腔体焊缝等维持在自身耐温范围内,所以冷却器材料选用通水循环的铜管缠绕固定在铝板上集中降温,铜管缠绕增加冷却面积,铝板集中降温冷却效果佳和安装维护方便;(7)既要充分带走加热器散失20%热量,同时又不会造成加热器热量利用率下降,安装布置加热器与冷却器时考虑两者之间最佳相对位置距离,经验参考与试验确定;(8)由于加热冷却系统安装在高真空镀膜室,而加热器、冷却器要分别通电、通水才能发挥功能作用,所以设计带法兰密封加热、水冷引出接头,将加热器热电偶、加热正负电极及冷却器铜管接头固定到镀膜室外,方便电、水安全可靠地引入到镀膜室内。

3 加热冷却系统的制造

加热冷却系统的制造包括电加热管折弯成形、镜面抛光反射板钣金加工及与电加热管、瓦楞板组装成加热模块;冷却铜管折弯缠绕成形并与冷却铝板固定成组件;加热器、冷却器通过固定螺栓固定于腔体板上等。加热器、冷却器制造关键点在折弯绕制成形、钣金加工、标识及焊缝检漏上,按控制点严格加工制造并按设计技术要求处理并验收。(1)折弯绕制成形:铠装电加热管、冷却铜管都是按设计工装折弯后等间距缠绕成形,由于真空镀膜室里安装总成较多,结构

紧凑加上受热后不同程度变形,所以加热器、冷却器折弯加工成形后平整度、间隙等严格按设计图纸加工制作,否则因变形后拆卸维护困难;(2)钣金加工:设计4层镜面抛光反射板、侧部隔热屏及冷却铝板都需要钣金加工制作,即使考虑到高温加热变形设计预留膨胀间隙,但对每块板钣金加工提出更高的要求,否则很难拼装成组件或间隙不足加热变形后翘曲引起干涉或划伤玻璃等问题;(3)标识:加热器按模块化设计,加热功率、外形尺寸及安装位置各不相同,需要在加工制造中进行标识以示区分,方便安装维护和上位机准确控制;(4)检漏:由于加热器、冷却器按模块化设计,整体式组装,所以漏点相应增加且较难判断漏点准确位置,给真空室抽极限真空及维持高真空度带来困难,需要将加热器、冷却器漏率控制在要求范围内,对加热器冷端电极、水冷接头等焊缝检漏确认。

加热冷却系统的制造质量不仅影响外观而且对薄膜性能质量、产量及安全起决定作用,如加热器加热能力不按最佳沉积温度范围设计,则会造成薄膜晶相差,导致光学性能和电学性能不理想,转换效率不会很高;加热器加热能力不足、温升慢则影响TCO玻璃镀膜产量;冷却器冷却能力不足,腔体侧壁温度高会引起烫伤或焊缝变形等安全事故。由于真空腔体表面承受一个大气压强及各安装总成承重量等,所以要求冷却器能维持非加热区域平衡性。

4 加热冷却系统的应用情况

制作的加热冷却系统经客户现场安装、通电通水功能测试、高温加热变形检测包括隔热屏、均热板及其固定螺栓等及真空度数据比较等都符合设计要求。加热功率设计保证满足工艺最佳沉积温度范围,加热器设定温度值偏差在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 范围内,各镀膜加热室温升速率也达到设定值,连续运行一段时间后通过红外测温仪检测腔体外壁等关键部位温度在 50°C 范围内,满足安全和实用要求。现场一段时间的调样、测试及批量生产验证TCO镀膜玻璃主要技术指标,如电阻值 $\approx 16\Omega$ 、透光率 $\geq 82\%$ 、电阻均匀性偏差 $\leq \pm 5\%$ 及光散射能力 $H_a \geq 25\%$,该TCO透明导电玻璃应用于薄膜太阳能电池组件中的前电极,经生产试验可替代进口FTO玻璃,用其制作出电池板组件平均转换效率较高,在10%左右,与进口FTO玻璃平均转换效率不相上下。总之,该真空系统设计达到预期设计效果,设计合理、紧凑,运行平稳可靠。从而确保了整条TCO镀膜线的正常运行。

5 结论

TCO玻璃作为薄膜电池的透明电极,其质量的好坏对薄膜电池的性能起着非常重要的作用,如直接影响电池光电转换效率,所以采用磁控溅射镀膜技术,在高温玻璃基片上镀上 SiO_2 和AZO两种膜层实现透明导电性能,对加热冷却系统设计提出了很高的要求:(1)因沉积温度显著影响薄膜的光学性能及电学性能,并最终影响太阳能电池组件光电转换效率;(2)加热器布置距离不仅影响热量利用率,同时也影响动态沉积速率,所以为控制溅射靶材的温度上升,加热器布置尽可能远离靶材;(3)基片沉积温度对薄膜结构的影响,在一定温度范围内形成的薄膜具有较好的结晶度,且密度较高,刻蚀的形貌也好;(4)冷却器的设计不仅对控制变形非常重要,而且对镀膜完的玻璃快速均匀降温同样关键,否则会出现玻璃破碎在腔体里或

在片台上;(5)加热器冷却器模块化设计,加热功率和冷却能力调整方便。加热冷却系统是整个TCO透明导电玻璃镀膜线非常重要的部件之一,设计和制造质量好坏决定整条镀膜线的性能。

参考文献

- [1] 姜辛,孙超,洪瑞江,戴达煌.透明导电氧化物薄膜.高等教育出版社 2008.10
- [2] 达道安.真空设计手册(第三版).北京:国防工业出版社 2004
- [3] 刘国龙,关巍,高远.TCO玻璃的应用及制备方法.安阳工学院学报
- [4] 鲁大学,曹阳.光伏TCO镀膜玻璃的应用技术分析.中国建材报
- [5] 机械设计手册编委会.机械设计手册(第三版).机械工业出版社 2004
- [6] 杨世铭,陶文铨.传热学(第三版).高等教育出版社 1998

(上接第10页)

有提升空间,AZO将逐步替代FTO成为薄膜太阳能电池用TCO玻璃的主流。

生产出性能成熟和理想形貌的AZO产品,要通过严格控制镀膜生产工艺和蚀刻生产工艺。同时把蚀刻生产工艺与具体镀膜生产工艺相匹配,才可能获得性能成熟和表面形貌理想的AZO产品。这是一个整体的过程,不能各自独立的去完成各自工序。

传统的生产工艺采用的蚀刻方法是强酸或弱酸一次蚀刻工艺,但是在大面积量产中,形成的绒面结构存在各种缺陷,且雾度很难做到超过60%,透过率82%就达到瓶颈。在膜层质量一定的情况下,改进现有的蚀刻工艺,比如强弱混合酸的一次蚀刻法,和先强酸后弱酸的二次蚀刻法,都可以获得较理想的绒面结构和更高的雾度和透过率。具有理想的绒面结构和高的雾度和透过率的AZO,完全有机会替代FTO,成为薄膜电池用TCO玻璃的主流。

参考文献

- [1] H. Pulker, Coatings on Glass, Elsevier, 1984
- [2] P. Barna, M. Adamik, Science and Technology of Thin Films, World Scientific Publishing Co, Singapore, 1995
- [3] J. Meier, U. Kroll, S. Dubail, S. Golay, S. Fay, J. Dubail, A. Shah, Proceedings. 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, Alaska, 15 - 22 Sept., 2000, p. 746
- [4] M. Berginski et al. / Thin Solid Films 516 (2008) 5836 ~ 5841
- [5] S. Calnan et al. / Thin Solid Films 516 (2008) 1242 ~ 1248

- [6] T. Minami, K. Oohashi, S. Takata, Thin Solid Films 193/194 (1990) 721
- [7] D.E. Carlson, C.R. Wronski, in: M.H. Brodsky (Ed.), Amorphous Silicon, Topics in Applied Physics, vol. 36, Springer, Berlin, 1979, p. 287
- [8] J.I. Pankove, Optical Processes in Semiconductors, Dover Pub., New York, 1971
- [9] V. Sittinger et al. / Thin Solid Films 496 (2006) 16 ~ 25
- [10] H. Stiebig, T. Brammer, T. Repmann, O. Kluth, N. Senoussaoui, A. Lambertz, H. Wagner, in: H. Scheer, B. McNelis, W. Palz, H.A. Ossensbrink, P. Helm (Eds.), Sixteenth European Photo-voltaic Solar Energy Conference, Glasgow, UK, May 1 - 5, 2000, Proceedings I (2000) 549
- [11] P. Beckmann, A. Spizzichino, The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Pergamon press, Oxford, London, New York, Paris, 1963
- [12] 董强.大面积玻璃镀膜, 2006

