

TCO 光伏玻璃光电性能分析与检测

王 威 黄达泉

北京奥博泰科技有限公司 北京 100070

摘要 本文介绍了 TCO 光伏玻璃的重要性能参数, 以及各参数对于光伏电池模块的影响, 并详细阐述了实验室检测和生产过程中 TCO 光伏玻璃的检测方法, 并着重介绍光谱测量对于光伏行业的重要性, 希望通过本文的介绍, 对于国内太阳能光伏行业大发展中, 国内大量新建 TCO 镀膜生产线的质量控制方法起到借鉴作用。

关键词 TCO 光伏玻璃 光电性能 检测

1 引言

TCO (Transparent conducting Oxide) 镀膜玻璃, 即透明导电氧化物镀膜玻璃, 是在超白平板玻璃表面通过物理或者化学方法均匀的镀上一层透明的导电氧化物薄膜, 是薄膜太阳能电池不可或缺的重要组成部分。TCO 镀膜玻璃的光谱透过率、光谱雾度以及表面电阻直接影响薄膜太阳能电池最终的发电效率, 通过对这些重要性能参数的分析和检测, 能有效的控制 TCO 镀膜玻璃在大规模制作过程中产品的稳定性、一致性。

2 TCO 镀膜玻璃(TCO Coated Glass)的特性及种类

目前 TCO 镀膜玻璃生产方式主要有两种, 化学气相沉积法 (APCVD) 和磁控溅射法 (PVD), 化学气相沉积法又分为在线化学气相沉积法和离线化学气相沉积法以及低压化学气相沉积法, 磁控溅射法是目前最热门的研究方向。

在线化学气相沉积法是在浮法生产过程中进行的在线高温沉积 SnO₂:F, 是目前光伏 TCO 镀膜的主要生产方式, 代表厂商 AGC, 其产品特点是生产过程中直接产生雾度, 可以生产大尺寸的玻璃, 膜层稳定性最好, 耐酸碱性能突出, 易于存储运输, 但透光性能和导电性能相对较差。

离线化学气相沉积法是在超白浮法玻璃生产之后, 再行加热后进行化学气相沉积得到光伏 TCO 镀膜玻璃, 这种生产方式适宜深加工企业发展, 投入低, 但过于耗能, 产品特性类似于在线 CVD 方式。

低压化学气相沉积法是类似于离线化学气相沉积法, 但沉积温度低、并且可以镀前电极或者背电极, 是一种有前途的生产方法。

磁控溅射法镀膜的氧化锌基薄膜的研究进展迅速, 材料性能已经与 ITO 相比拟, 其中铝掺杂的氧化锌 (AZO) 薄膜研究较为广泛, 突出优势是原料易得, 制造成本低廉, 无毒, 易于实现掺杂, 且在等离子体内稳定性好, 预计会很快成为新型的光伏 TCO 产品, 目前有许多企业和研究部门正在这个方向上努力研究, 目前主要的问题是工业化大面积镀膜的技术问题, 由于膜层厚度较大, 边缘效应问题突出, 并且在后继的刻蚀工序中, 光谱雾度是另一个重要控制指标。

3 光伏电池对于 TCO 镀膜玻璃的性能要求及分析

3.1 有效透射光谱(Spectral Transmission)

为了能够充分的利用太阳光, TCO 镀膜玻璃一定要保持相对较高的透射率。目前产量最多的薄膜电池是双结非晶硅电池, 并且已经开始向非晶/微晶复合电池转化, 非晶硅半导体层的吸收范围主要在 400~700nm 的可见光范围, 而微晶硅半导体的吸收主要在 600~1000nm, 扩展到了近红外波段。因此非晶/微晶复合叠层能够吸收利用更多的太阳光, 提高转换效率, 将会成为薄膜电池的主流产品。

为了适应非晶/微晶硅层的光谱吸收范围, TCO 玻璃必须在可见和近红外波段上都保持着良好的光线透过性能。如何有效科学的表征 TCO 镀膜玻璃的有效透过率, 将直接关系到 TCO 镀膜玻璃制作过程中产品的控制与复现。不管是何种形式的薄膜电池结构, 其最终体现的是在一定波长范围内, 将光能转化为电能, 转化效率与光电转换的光谱响应曲线有直接的关系, 而 TCO 镀膜玻璃的透过率光谱决定了最终照射到电池光电转换层的光谱分布曲线, 由此可见, TCO 镀膜玻璃的有效透过率是与电池的光电转换光谱响应曲线(响应波长范围)、照射光源有直接的关联。

在建筑镀膜玻璃以及平板玻璃分析与检测中, 一般以可见光透射比表征该玻璃的品质, 如式1:

$$\tau_v = \frac{\int_{\lambda=380}^{780} \tau(\lambda) D(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=380}^{780} D(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad \text{式1}$$

其中: τ_v 为可见光透射比, λ 为波长, $\tau(\lambda)$ 为可见光透射比光谱, $D(\lambda)$ 为标准光源分布曲线, $V(\lambda)$ 为标准观察者光谱响应曲线。

显然, 由式1可见, 对于 TCO 镀膜玻璃, 可见光透射比的概念在此已不适应了, 可见光透射比不能有效表征 TCO 镀膜玻璃透过率的好坏, 因为电池的光电转换光谱响应波长范围已经超过了 380nm–780nm, 且电池的光电转换光谱响应曲线与标准观察者光谱响应曲线完全不同。若以可见光透射比来表征 TCO 镀膜玻璃透过率的好坏, 会造成 TCO 镀膜玻璃镀制过程中概念的混淆, 直接导致可见光透射比相同的情况下实际发电效率的不一致。

在此, 奥博泰公司提出有效透过率的概念, 如式2:

$$\tau_e = \frac{\int_{\lambda_s}^{\lambda_e} \tau(\lambda) S(\lambda) C(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_s}^{\lambda_e} S(\lambda) C(\lambda) d\lambda} \quad \text{式2}$$

其中: τ_e 为有效透射比, λ_s 为电池的光电转换有效起始波长, λ_e 为电池的光电转换有效结束波长, $\tau(\lambda)$ 为透射比光谱, $S(\lambda)$ 为太阳光谱分布曲线, $C(\lambda)$ 为电池的光谱响应曲线。

由式2可见, τ_e 与太阳光谱分布曲线以及电池的光谱响应曲线及其响应波长范围有直接关系, τ_e 可有效表征 TCO 镀膜玻璃透过率的好坏。对于不同形式的薄膜电池结构, 其有效响应波长、电池的光谱响应曲线是有很大差别的, 这也意味着, 相同的 TCO 镀膜玻璃, 若后继工序的不一致(电池结构不一致), 那么就会有不同的有效透射比。

目前, 国内 TCO 镀膜玻璃还处于发展阶段, 如何科学的分析与检测 TCO 镀膜玻璃的相关指标, 具有重要的意义。在实际在线或实验室仪器选用过程中, 应意识到可见光透过率或某一指定波长透过率对于 TCO 镀膜玻璃不是科学的表征方法, 应采用有效透射比的概念。

3.2 导电性能(Conductivity)

TCO 导电薄膜的导电原理是在原本导电能力很弱的本征半导体中掺入微量的其他元素, 使半导体的导电性能发生显著变化。这些微量元素成为杂质, 掺杂后的半导体称为杂质半导体。氧化铟锡(ITO)透明导电玻璃就是将锡元素掺入到氧化铟中, 提高导电率, 他的导电性能在目前是最好的, 而目前研究最多、应用范围最广的是掺氟二氧化锡(SnO₂:F)薄膜, 以及磁控溅射 AZO 薄膜。TCO 镀膜的导电性能用面电阻(方块电阻)值表征, 面电阻值越低则 TCO 镀膜内阻越低, 导电性能就越好。

3.3 雾度(Spectral Haze)

为了增加薄膜电池半导体层吸收光的能力, 光伏用 TCO 玻璃需要提高对透射光的散射能力, 这一能力用雾度(Haze)来表示。雾度即为透明或半透明材料的内部或表面由于光漫射造成的均匀的

云雾状或混浊的外观。TCO 薄膜的雾度可以影响薄膜电池的光电转换效率，这种光散射能力与薄膜的晶粒尺寸大小、形状、粗糙度有关。

根据 GB/T 2410-2008、ASTM D 1003-2007 标准，透明或半透明材料的雾度按以下公式计算，见式3：

$$H = \left(\frac{T_4}{T_2} - \frac{T_3}{T_1} \right) \times 100 \quad \text{式3}$$

式中， H 为雾度（用百分比表示）， T_4 为仪器和试样的散射光通量， T_2 为通过试样的总透射光通量， T_3 为仪器的散射光通量， T_1 为入射光通量。

一般情况下，以可见光雾度作为表征透明或半透明材料的雾度，如式4

$$H_v = \left(\frac{T_{4v}}{T_{2v}} - \frac{T_{3v}}{T_{1v}} \right) \times 100 \quad \text{式4}$$

其中： H_v 为可见光雾度， T_{1v} 、 T_{2v} 、 T_{3v} 、 T_{4v} 为根据式1计算得出相应的可见光值。

对于 TCO 镀膜玻璃，每一个波长下的雾度均会影响薄膜电池的光电转换效率，如果单纯的用可见光雾度 H_v 来表征 TCO 镀膜玻璃的雾度，明显存在不足。在对 TCO 镀膜玻璃的雾度进行测量和分析时，应尽可能的得到电池响应波长范围内各波长的的雾度值 $H(\lambda)$ ，也即 TCO 镀膜玻璃的光谱雾度。在此，参照式2，奥博泰公司提出有效雾度的概念，如式5

$$H_e = \frac{\int_{\lambda_s}^{\lambda_e} H(\lambda) S(\lambda) C(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_s}^{\lambda_e} S(\lambda) C(\lambda) d\lambda} \quad \text{式5}$$

其中： H_e 为有效雾度， λ_s 为电池的光电转换有效起始波长， λ_e 为电池的光电转换有效结束波长， $H(\lambda)$ 为光谱雾度， $S(\lambda)$ 为太阳光谱分布曲线， $C(\lambda)$ 为电池的光谱响应曲线。

科学地表征及分析 TCO 镀膜玻璃的雾度值，使其有效的与薄膜电池的光电转换效率建立起对应关系，对 TCO 镀膜玻璃雾度工艺的定标有着决定性的意义。

4 光伏 TCO 镀膜玻璃相关检测设备

TCO 镀膜玻璃在制备过程中，需要对其光谱透过率、面电阻、雾度进行有效的控制，这些指标是保证产品稳定、可靠的关键性指标，所以对这些指标的检测是非常必要的。根据不同的生产需要，可以配备不同的在线检测仪器、实验室仪器以及手持式仪器。

以下介绍几种典型的检测设备：

4.1 在线透射光谱测量系统(Online Spectra Transmission Measurement)

根据 TCO 镀膜玻璃生产过程的需要，可以在各个工序位置安装透射光谱测量系统，该系统可以实现实时在线测量该位置玻璃的透射光谱。该测量系统要求波长覆盖范围较宽，一般要达到 380nm-1100nm，且测量速度要快，采集一次光谱的时间极短。该系统根据安装位置的不同，功能用途略有不同。若安装在 TCO 镀膜成膜过程工序（如离线磁控镀膜的真空室内），则可以根据透射光谱的变化计算出成膜的光学厚度；若安装在 TCO 镀膜雾化前，则可以测量出 TCO 镀膜玻璃未雾化前的透射光谱曲线，通过监控该曲线，可有效的保证镀膜的一致性；若安装在雾化工序（或刻蚀）后，则可以测量出 TCO 镀膜玻璃雾化后的有效透射光谱分布，并能计算出有效透射比。TCO 镀膜玻璃在雾化（或刻蚀）后，由于玻璃已经带有较大的雾度散射，使用常用的仪器无法准确的测量出玻璃的透射光谱曲线，为此需要专门的光学测量机构来实现对带雾度散射玻璃的测量。

北京奥博泰科技有限公司针对各种 TCO 镀膜生产线，研发出专门适用于 TCO 镀膜玻璃的在线透

射光谱测量系统，该系统可快速实现各种带雾度散射玻璃的透射光谱测量，测量一次光谱的时间仅需要1秒左右，并根据 TCO 镀膜玻璃实际的使用情况，给出有效透射比。

通过在线透射光谱测量系统的使用，可实时的得到不同工序下玻璃的透射光谱变化，对稳定生产、提高玻璃品质起到非常重要的作用，是生产 TCO 镀膜玻璃非常必要的检测设备。

4.2 在线光谱雾度测量(Online Spectral Haze Measurement System)

根据 TCO 镀膜玻璃的特性，在 TCO 成膜雾化（或刻蚀）后，玻璃膜层表面会有不同程度、不同形状的凹凸不同，从而提高对透射光的散射能力，增加玻璃电池半导体层吸收光的能力。在 TCO 镀膜成膜雾化后，需要对该玻璃的雾度指标进行测量。

北京奥博泰科技有限公司生产的在线光谱雾度测量系统，可以实现对 TCO 镀膜光谱雾度的在线测量，该系统测量速快，可以方便的得到各波长下的雾度值。该技术填补了国际上该领域的空白。

4.3 在线面电阻测量 (Online Resistivity Measurement System)

面电阻是 TCO 镀膜玻璃的一项重要性能指标，对面电阻进行实时测量具有重要的意义。由于生产线的特点，在线面电阻测量一般要求非接触测量。根据生产工艺的不同，在线面电阻测量系统可以安装在 TCO 镀膜玻璃镀膜后雾化前的工位以及雾化后的工位，这样即可以实时测量 TCO 镀膜玻璃在各工艺下的稳定性，也可以监测雾化前后面电阻的变化，是生产 TCO 镀膜玻璃非常必要的检测设备。

根据生产线的不同，非接触式面电阻测量系统可以为单点式、扫描式以及多探头式。单点式只能测量玻璃某一处纵向上的面电阻分布，扫描式可以测量玻璃横向以及纵向的面电阻分布，多通道式可以快速的实现玻璃横向多通道下的纵向面电阻分布。各中配置各有优缺点，可以根据实际情况配置。

4.4 实验室相关测量仪器

由于在线仪器相对复杂，工作环境也具有一定的限制，根据生产的实际要求，可以配置相应的实验室测量仪器，包括：台式光谱透射测量仪器、台式光谱雾度测量仪器、台式面面电阻测量仪器。

面电阻测量仪器分为四探针 (4-Point Surface Resistivity Meter) 及感应式面电阻测量 (Non-Contact Sheet Resistivity Measuring Device) 方式，根据测试实际情况，对于样品可采用四探针测量方式，对于成品测量为了避免划伤膜层表面可采用感应式测量设备。

5 总结

由于薄膜太阳能电池的飞速发展，使目前光伏用 TCO 玻璃市场变得非常紧俏。在导电玻璃领域中，光伏 TCO 玻璃有着独特的性能要求，这些特性指标与太阳能电池的输出特性密切相关，可以说，薄膜太阳能电池的发展将在一定程度上依赖于光伏 TCO 的改进程度。能源紧缺促进了光伏产业的发展，也必将推动光伏 TCO 玻璃产品的快速发展。

作者简介

王威 (Wangwei)，1976. 3出生，男，籍贯：黑龙江，职称：工程师，学位：学士；毕业于北京理工大学光学工程系，从事在线光学检测仪器的开发及市场推广工作。工作单位：北京奥博泰科技有限公司 (Beijing Aoptek Scientific Co., Ltd.); 通讯地址：北京丰台科技园航丰路8号科研楼；邮政编码：100070。

E-mail: wangwei@aoptek.com

黄达泉 (Huangdaquan)，1977. 7出生，男，籍贯：江西，职称：工程师，学位：学士；毕业于东南大学仪器科学与工程系，从事光学检测仪器研发，自1999年开始研究薄膜光学性能在线检测及光学膜厚监控；工作单位：北京奥博泰科技有限公司 (Beijing Aoptek Scientific Co., Ltd.); 通讯地址：北京丰台科技园航丰路8号科研楼； 邮政编码：100070；

E-mail: hdq@aoptek.com