

太阳能电池的基本原理及其对应的光伏玻璃

万军鹏 黄华义

信义玻璃控股有限公司技术中心 广东东莞 523935

摘要 本文简要概述太阳能电池和光伏玻璃的种类和基本原理,然后重点介绍晶体硅太阳能电池,以及非晶硅薄膜电池、碲化镉薄膜电池和铜铟镓硒薄膜电池三种主流薄膜电池的结构和原理,并分析和讨论了不同太阳能电池对玻璃基片和透明导电膜的要求。

关键词 太阳能电池 光伏玻璃 TCO

1 太阳能电池概述

能源危机已经成为当今世界日益严重的共同问题,而太阳能作为一种可再生清洁能源,取之不尽,用之不竭,现已被世界各国大力发展和利用。地球表面接受的太阳能辐射能够满足全球能源需求的1万倍,约1小时照射到地球的太阳辐射可满足全球人类一年的能量消费。据国际能源署数据显示,在全球4%的沙漠上安装太阳能光伏系统,就足以满足全球的能源需求^[1]。因此,太阳能光伏享有广阔的发展空间(屋顶、建筑面、空地和沙漠等),其潜力十分巨大,以太阳能为代表的可再生能源在能源结构中的比例将逐步提高。

太阳能电池是指利用光电效应使太阳的辐射光通过半导体物质转变为电能的装置。这种光电转换过程通常叫做“光生伏特效应(Photovoltaic Effect)”,太阳能电池又称为“光伏电池”,能产生这种效应的太阳能电池种类较多,大致可以分为以下几类:

- (1) 晶体硅太阳能电池:单晶硅、多晶硅;
- (2) 薄膜太阳能电池:非晶硅/微晶硅、碲化镉、铜铟镓硒、砷化镓等;
- (3) 有机太阳能电池:染料敏化DSSC、聚合物等;

其中,砷化镓和有机太阳能电池多数处于研究或小规模生产阶段,非市场主流,因此本文不予介绍。虽然太阳能电池的种类繁多,但它们的发电原理基本相同,核心材料都是禁带宽度不是太宽(通常 $E_g=1.1-1.8\text{eV}$)的半导体材料,以晶体硅为例描述光电转换过程:

当太阳光线照射太阳能电池表面由p、n型两种不同导电类型的半导体材料构成的p-n结上时,光子能量超过半导体禁带宽度的部分太阳光子被硅材料吸收,使电子从价带跃迁到导带,形成新的电子-空穴对。在p-n结电场的作用下,空穴由n区流向p区,电子由p区流向n区,形成内建静电场。如果从内建静电场的两侧引出电极并接上适当负载,就会产生一定的电压和电流,对外部电路产生一定的输出功率。这个过程的实质就是光子能量转换成电能的过程^[2]。

所以,要提高太阳能电池的发电效率,一是要尽量提高入射阳光辐射能量,即半导体材料中产生电子-空穴对所需要的光能,而这与半导体材料的禁带宽度有关,理论研究表明光学禁带宽度约 1.35eV 的材料转换效率最高;二是要尽量提高电子-空穴对的数量,这取决于材料对阳光辐射的吸收常数,此外还要尽量减少电子-空穴对在输出过程中的再结合^[3]。

2 光伏玻璃概述

目前,应用于太阳能电池中的光伏玻璃主要有两大类,一是超白压花玻璃,主要应用于晶体硅电池的盖板玻璃;二是透明导电氧化物镀膜玻璃,即TCO玻璃,主要应用于薄膜电池的透明导电膜基片。

2.1 超白压花玻璃

超白压花玻璃是指用压延法生产的一种超白光伏玻璃(又称低铁玻璃),最新的行业标准《太阳能电池用玻璃》中规定玻璃铁含量不高于 150ppm ,玻璃折合 3mm 标准厚度可见光透射比应 $\geq 91.5\%$,折

合3 mm标准厚度的太阳光（300~2500nm光谱范围）直接透射比应 $\geq 91\%$ 。正是由于超白玻璃在晶体硅太阳能电池光谱响应范围（380~1200nm）内具有高透过率，因此被广泛用于晶体硅太阳能电池的玻璃盖板。

这种玻璃的常规厚度为3.2mm和4mm，表面花型主要是布纹单绒面和双绒面两种，表面制绒主要是为了减少反射，而更有效的方法是在表面镀减反射膜。之所以要用低铁超白玻璃，主要是由于其透过率高；镀减反射膜也是为了提高透过，而玻璃盖板的透过率每提高1%，电池的发电量也约提高1%，可见玻璃盖板的透过率对电池发电效率的重要性。

图1给出的是4mm厚普通浮法玻璃与超白浮法玻璃的透过率曲线对比，可以直观看到普通浮法玻璃不仅可见光部分透过率低于超白浮法玻璃2%左右，而且由于普通浮法玻璃约0.1%的铁含量，尤其是 Fe^{2+} 位于1060nm处的吸收峰导致其近红外部分的透过下降明显，这将严重影响晶体硅电池的发电效率。图2给出的是3.2mm超白压花玻璃镀减反射膜前后玻璃的透过率，在绒面单面镀减反射膜后，玻璃的透过率增加2%以上，效果非常明显。

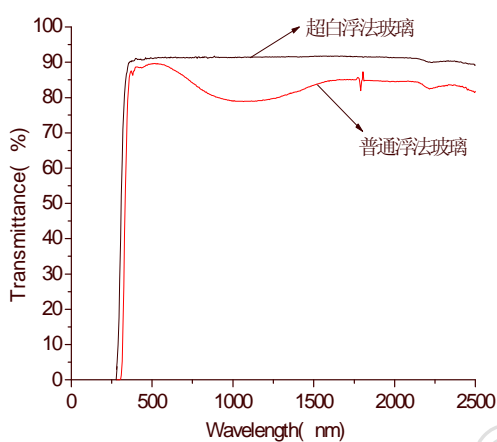


图1 普通浮法玻璃与超白浮法玻璃的透过率

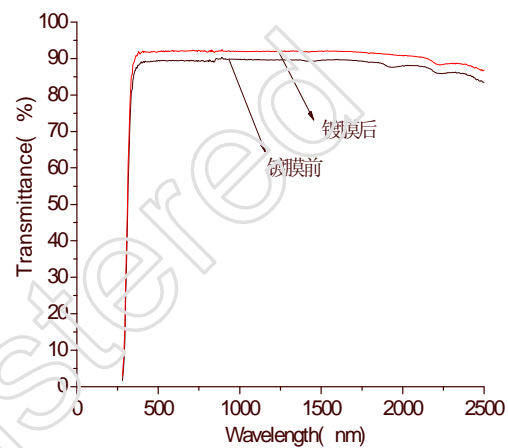


图2 超白压花玻璃镀减反射膜前后透过率

2.2 TC0玻璃^[4-7]

透明导电氧化物镀膜玻璃（简称TC0玻璃），是在平板玻璃表面通过物理或者化学镀膜的方法均匀的镀上一层透明的导电氧化物薄膜。其膜材料主要包括In、Sn、Zn和Cd的氧化物及其复合多元氧化物薄膜材料。透明导电氧化物薄膜最早出现在20世纪初，1907年Badeker首次制备出CdO透明导电膜，从此引发了透明导电膜的开发与应用。1950年前后出现了 SnO_2 基和 In_2O_3 基薄膜，ZnO基薄膜的研究始于20世纪80年代。

而目前最主要的三种TC0膜分别是ITO膜（Sn: In_2O_3 ）、FTO膜（F: SnO_2 ）和AZO膜（Al: ZnO）。这三种TC0膜的有关技术指标如表1所示。TC0薄膜一般为n型半导体，禁带宽度大于3.3eV，具有高载流子浓度（ $10^{18} \sim 10^{21} \text{cm}^{-3}$ ），低电阻率（ $10^{-3} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ），高可见光透射率（80%~90%）和高红外光反射率（>70%）等共同光电特性，广泛地应用于平面显示器件、太阳能电池、反射热镜、特殊功能窗口涂层及其他光电子、微电子、真空电子器件领域。

TC0薄膜最重要的特性是导电性和对可见光的透明性。电导率主要由载流子浓度和霍尔迁移率决定（ $\sigma = qn\mu$ ，其中 σ 为电导率， q 为载流子电量， n 为载流子浓度， μ 为霍尔迁移率）。TC0薄膜的高电导率主要取决于它的高载流子浓度，其载流子主要是通过氧缺位和掺杂来提高，1个氧缺位产生2个自由电子，1个掺杂离子一般产生1个自由电子（如ITO中 Sn^{4+} 取代 In^{3+} ，FTO中 F^- 取代 O^{2-} ，AZO中 Al^{3+} 取代 Zn^{2+} 后，就会产生一个自由电子以维持电中性）。因此，以上TC0膜的导电性主要由电子传导产生，属于n型半导体。

TC0薄膜的禁带宽度 E_g 都大于可见光子能量（380nm~3.3eV，光波长 λ 与能量 E 存在近似换算关系： $\lambda E = 1240$ ），如表2所示。因此，在可见光照射下，其光子能量小于薄膜禁带宽度，能量不足以激发半导体中电子从价带跃迁至导带，所以不能引起本征吸收，这是TC0膜对可见光呈透明性的主要原因。

只有光子能量等于和大于 E_g 的紫外光才会引起激发和吸收，即产生“紫外吸收截止”。而TCO膜的禁带宽度与其载流子浓度密切相关，掺杂后的TCO膜由于载流子浓度增加会导致禁带宽度变宽，即相应的紫外吸收截止波长会变小。

表1 TCO膜有关技术指标

种类	禁带宽度 E_g (eV)	载流子浓度 (cm^{-3})	电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
ITO	3.75	1×10^{21}	10^{-4}
FTO	3.87	3×10^{20}	6×10^{-4}
AZO	3.54	4×10^{20}	5×10^{-4}

表2 不同波段太阳光的光子能量

名称	紫外光	可见光	红外光
波长范围 (nm)	280~380	380~780	780~25000
光子能量 (eV)	>3.3	1.6~3.3	<1.6

下面分别介绍三种主要的TCO膜：

(1) ITO膜 ($\text{Sn}:\text{In}_2\text{O}_3$) 是一种非常成熟的产品，主要采用磁控溅射方法生产，具有透过率高，膜层牢固，导电性好等特点。有研究表明，掺锡量在10%左右时，其电阻率最低，透过率最高。目前主要应用于显示器领域做透明导电膜。初期也曾尝试应用于薄膜电池的前电极，但随着电池对光吸收性能要求的提高，TCO玻璃必须具备提高光散射的能力，而ITO镀膜很难形成绒面，并且激光刻蚀性能也较差；In为稀有元素，价格较高；In在后续的PECVD工艺中不够稳定，易被还原。因此ITO膜不适合用作薄膜电池尤其是非晶硅薄膜电池的前电极。

(2) FTO膜 ($\text{F}:\text{SnO}_2$) 的制备主要是以喷涂、高温热分解、CVD等方法为主，锡源主要是 SnCl_4 ，氟源主要是 NH_4F 或 HF ，通常掺1%左右的F。由于其热稳定性好、化学稳定性好、硬度高等特点，在建筑用Low-E玻璃中也有一定的应用。其导电性能在三种TCO产品中最低，但具有成本相对较低，激光刻蚀容易，光学性能适宜等优点。通过对普通Low-E的生产技术进行升级改进，制造出导电性比普通Low-E好，并且带有雾度的产品，利用这一技术生产的FTO玻璃已经成为目前薄膜光伏电池的主要产品。

(3) AZO膜 ($\text{Al}:\text{ZnO}$) 的研究进展迅速，未掺杂的 ZnO 薄膜的电阻率约为 $3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ，而掺杂1%~3%的Al后，电阻率可下降至 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 量级，说明Al的掺杂有效地提高了 ZnO 薄膜的电导率。AZO薄膜的主要工业化生产方法是磁控溅射法，然后再用酸刻蚀来表面制绒，绒面的表面结构主要是为了增加光漫反射，提高薄膜电池对光的吸收。AZO膜刻蚀前后在可见光区的透过率均超过80%，未刻蚀AZO膜的面电阻小于 8Ω ，刻蚀后其电阻小于 10Ω ，雾度在10%~40%可控可调。AZO膜的突出优势是原料丰富，制造成本低廉，无毒，易于实现掺杂，且在等离子体中稳定性好，还有一个优势就是其近红外透过高于FTO。因此，它将会成为最有竞争力的新型光伏TCO产品。

3 晶体硅太阳能电池^[2, 8]

2009年全球太阳能电池总产量约10GW，比2008年的6.8GW增长超过40%；中国的产量达到4GW，占到世界总产量的40%。而截至2009年底，太阳能电池的主流还是晶体硅电池，占到80%左右，并且晶体硅电池尤其是多晶硅电池在接下来的一段时间仍将是市场的主流产品。

晶体硅太阳能电池的结构如图3所示，其核心部件就是晶体硅电池片 (CELL)，多个电池片通过汇流条以串联 (为提高电压) 和并联 (为提高电流) 的方式连接起来，然后再用封接材料EVA将电池片与玻璃盖板和TPT底板在层压机中层压结合，最后镶上铝合金框架并装上接线盒就成为一个完整的电池组件，如图4所示。

在电池组件的转换效率一定的情况下，透过玻璃盖板的阳光辐射量的高低就决定电池组件的发电量。因此，玻璃盖板除了具备一定的机械强度和热学性能以保护电池片之外，最重要的就是要求透过率高。而晶体硅电池的禁带宽度约1.1eV，所以只有波长小于1200nm的太阳光才能使其发电；此外，EVA几乎完全吸收紫外光。所以，其相应的光谱响应范围是380~1200nm，这就要求玻璃盖板在380~1200nm范围的透过率尽量高。根据图1所示普通浮法玻璃与超白浮法玻璃的透过率曲线可以看出，普通浮法玻璃不仅可见光透过率低于超白浮法玻璃，而且更为重要的是由于其铁含量相对较高， Fe^{2+} 位于1060nm处的吸收峰导致其近红外部分的透过更加明显的低于超白浮法玻璃，即超白玻璃在晶体硅电池光谱响应范围380~1200nm始终保持非常高的透过，这也是为何晶体硅电池要用超白玻璃做盖板的重要原因。此外，在超白玻璃表面镀上减反射AR膜后，透过率又会有所提高，这样就能保证最大限度的提高入射阳光辐射能量，以提高电池的发电量。

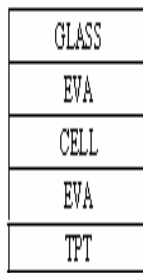


图3 晶体硅电池结构示意图

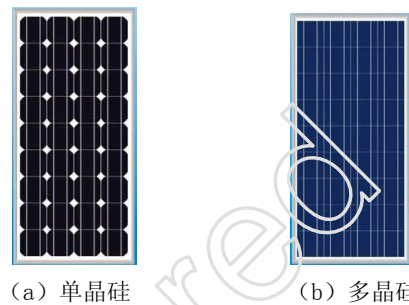


图4 晶体硅电池组件平面示意图

3.1 单晶硅电池

单晶硅电池是当前开发最快的一种太阳电池，它的结构和生产工艺已定型，产品已广泛用于空间和地面。这种太阳电池以高纯的单晶硅棒为原料，纯度要求99.999%。将单晶硅棒切片，厚度约0.2mm，常规尺寸为125×125mm和156×156mm。硅片经过腐蚀、制绒、清洗等工序，制成待加工的原料硅片。加工太阳能电池片，首先要在硅片上掺杂和扩散，一般掺杂物为微量的硼、磷、镓等。扩散是在石英管制成的高温扩散炉中进行。然后采用丝网印刷法，将配好的银浆印在硅片上做成栅线，经过烧结，同时制成背电极，并在有栅线的面涂覆氮化硅减反射膜，以防大量的光子被光滑的硅片表面反射掉。这样，单晶硅电池片就制成了。单片经过抽查检验，即可按所需要的规格组装成太阳电池组件，用串联和并联的方法构成一定的输出电压和电流。因为普通晶体硅单个电池片只有0.5伏左右的电压，需要用汇流条将其串联以提高输出电压。最后用铝合金框架和封装材料进行封装。用户根据系统设计，可将太阳电池组件组成各种大小不同的太阳电池方阵，亦称太阳电池阵列。目前单晶硅电池片的光电转换效率为18%左右，实验室成果已接近30%。

3.2 多晶硅电池

由于单晶硅电池的生产需要消耗大量的价格高昂的高纯硅材料，制造工艺复杂，损耗大，电耗大，造成单晶硅成本价格居高不下，阻碍了单晶硅太阳能电池的发展，现在正在逐渐被多晶硅太阳能电池和非晶硅薄膜太阳能电池等取代。加之拉制的单晶硅棒呈圆柱状，切片后电池片也是圆片，即使加工成方形，四个角的圆弧倒角（如图4a所示），也会导致组成太阳能组件的平面利用率低。

而目前太阳电池使用的多晶硅材料，多半是含有大量单晶颗粒的集合体或用废次单晶硅料和冶金级硅材料熔化浇铸而成。其工艺过程是选择电阻率为100~300 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的多晶块料或单晶硅头尾料，经破碎后用石英坩埚装好多晶硅料，加入适量硼硅，放入浇铸炉，在真空状态中加热熔化。熔化后应保温约20分钟，然后注入石墨铸模中，待慢慢凝固冷却后，即得多晶硅锭。这种硅锭可铸成立方体，以便切片加工成方形电池片（边长通常为125、150、156、210mm，厚度约0.2mm），后续加工同单晶硅相同。相比单晶硅电池片，方形多晶硅电池片可提高组件的利用率和方便组装。此外，多晶硅电池片的纯度要求不如单晶硅高，所以其成本低，但光电转换效率仅略低于单晶硅，约16%。因此，多晶硅电池占晶体硅电池的比例也在逐年上升，各地也都争先抢上多晶硅项目。

4 薄膜太阳能电池

2009年全球薄膜太阳能电池产量达到约2GW，虽占总产量的比例仍然不高，约20%，但其增长速度非常快，相比2008年增长超过120%。可以预计，将来薄膜电池的市场份额还将继续提高。

4.1 非晶硅及微晶硅^[9-11]

非晶硅薄膜电池的结构如图5所示，首先在玻璃表面镀上TCO膜用作透明前电极；激光平行刻蚀后采用PECVD工艺依次沉积p、i、n型硅膜：先沉积一层掺硼的硅层作为P型非晶硅，再沉积一层未掺杂硅层作为本征吸收i层，最后沉积一层掺磷的硅层作为N型非晶硅；然后对pin层进行激光刻蚀；再沉积一层金属背电极；最后再对金属背电极进行刻蚀，以便于制作多个串联电池，以获得较高的输出电压。这样就形成一个单pn结的非晶硅薄膜电池模块。通过多次沉积还可以制备出双结或多结非晶硅薄膜电池，但加工难度和成本会大大提高。

非晶硅可缩写为 $\alpha\text{-Si:H}$ ，表示硅材料中掺杂了10%左右的氢，它使非晶硅中存在的饱和原子键更加饱和，以减少电子-空穴对发生再结合。非晶硅材料的禁带宽度约1.75eV，并不是最佳，其光谱响应范围如图6所示，仅在可见光范围（玻璃和TCO膜吸收紫外光）；并且非晶硅对光的吸收系数虽然大大高于晶体硅，但在薄膜电池中不算最好。所以，在pn结之间必须引入本征吸收i层，一方面i层应足够厚，以吸收尽可能多的太阳能；另一方面i层也不能太厚，太厚容易引起电子-空穴对的传输过程中的再结合。研究表明，i层厚度在400nm左右合适。这样，再加上p层和n层10~20nm左右的厚度，整个非晶硅电池所用硅膜层只要0.5 μm ，而晶体硅电池中硅片的厚度虽然在不断变薄，但仍有约200 μm ，二者对硅的消耗量一目了然。

非晶硅薄膜太阳能电池制作简单，硅材料消耗很少，重量轻，电耗低，成本较低，便于大规模生产，普遍受到重视并得以迅速地发展。但目前主要问题是光电转换率较低，单pn结的稳定转换效率约6%，并且存在光致衰减效应，即稳定性较差。提高转换率和稳定性是非晶硅薄膜太阳能电池的发展方向。

从图5可以看出，非晶硅薄膜电池需要用到TCO膜，一是利用其透明性，使太阳光透过并被非晶硅吸收，二是利用其导电性作为前电极。之前对TCO膜的分析中，目前可应用于太阳能电池的TCO膜主要是FTO和AZO，尤其是对于非晶硅薄膜电池的光谱响应范围——可见光，都具有较高的透过率。而一般对于TCO膜的基本要求是：透过率 $>80\%$ （380~780nm或380~1100nm）；雾度10%~20%；面电阻 $<10\Omega$ 。

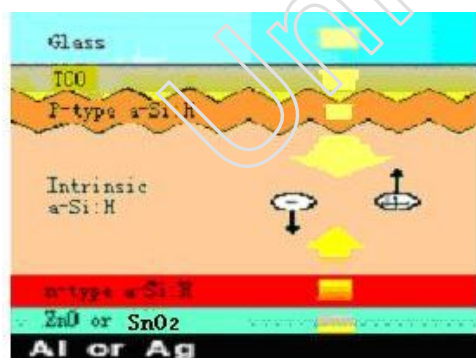


图5 非晶硅薄膜电池的结构示意图

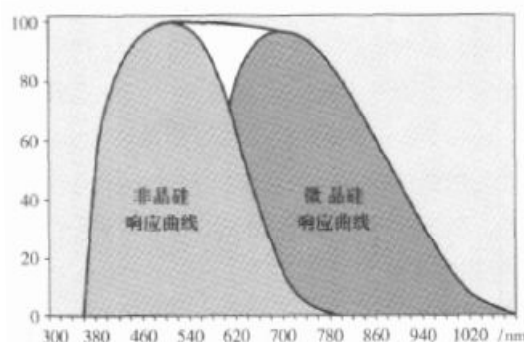


图6 非晶硅和微晶硅薄膜电池的光谱响应曲线

非晶硅薄膜电池虽然用硅量少，但其转换效率低，主要原因一方面是由于其禁带宽度不佳，光谱响应范围只有可见光部分，即对太阳光的利用少；另一方面是由于非晶硅中存在着一些饱和原子键，它提高电子-空穴对再结合的几率。多晶硅薄膜电池不仅转换效率高，而且性能稳定，但通常需要采用长时间热处理工艺，这就需要玻璃基片能耐高温。所以，基于制造成本，多晶硅薄膜电池目前不适于商业化开发。而一种有效的解决方式就是在非晶硅薄膜电池的i层之后引入一层约1.5 μm 厚的微晶硅膜层，这样形成非晶硅加微晶硅叠层薄膜电池。如图6所示，微晶硅光谱响应范围约380~

1100nm, 可以充分利用780~1100nm这部分近红外光, 这样可极大的拓宽电池的光谱响应范围以提高电池效率, 因此非晶硅加微晶硅叠层结构的稳定效率可提高到10%左右。引入微晶硅膜层后, 相应也就需要TCO膜不仅对可见光高透过, 而且还要能够对780~1100nm这部分近红外光也有较高透过, 而在这方面, AZO膜相比FTO膜就具有一定的优势。对于玻璃基片, 如前在晶体硅电池部分的分析一样, 为使更多的太阳光透过玻璃及TCO膜而被薄膜电池吸收, 尤其是微晶硅响应的部分近红外光, 玻璃基片同样需要超白玻璃, 只是不同于晶体硅的超白压花玻璃, 为便于镀TCO膜, 玻璃基片需要使用超白浮法玻璃。此外, 同样玻璃外表面镀上AR膜, 会进一步提高透过, 效果更好。

普通的非晶硅或与微晶硅叠层薄膜电池, 一般只需要一片玻璃, 而如果用作光伏建筑一体化(BIPV), 则需要使用多片玻璃, 通常的结构为先将薄膜电池做成夹层玻璃, 再做成中空结构。随着硅薄膜电池效率的提高, 发电成本的下降, 以及性能的稳定和外观的美化等, 硅薄膜电池在BIPV领域的应用将越来越广泛。

4.2 碲化镉^[12, 13]

虽然, 目前晶体硅是最主要的太阳能电池材料。然而, 硅并不是最理想的光伏材料, 一是硅材料属于间接带隙半导体材料, 光吸收系数很低, 在可见光范围内的吸收系数低于 10^4cm^{-1} ; 二是硅的禁带宽度1.1eV也不是最佳光伏响应的光学禁带宽度。而CdTe是直接带隙半导体材料, 具有很高的光吸收系数, 可见光部分吸收系数在 10^5cm^{-1} 左右, 不仅大大高于晶体硅, 还高于非晶硅; 并且其禁带宽度为1.45eV, 接近光伏材料理想的禁带宽度1.35eV。因此CdTe薄膜电池的理论转换效率在29%左右。

碲化镉薄膜电池结构示意图如图7所示, 虽然同质结P-CdTe/N-CdTe也可以做太阳能电池, 但是转换效率很低, 其原因是: CdTe的光吸收系数很高, 大部分光在电池表面1-2 μm 内就已被吸收并激发出电子-空穴对, 但这些少数载流子几乎在表面就再结合掉, 从而导致转换效率低。为避免这种情况, 一般采用异质结形式, 在CdTe表面沉积一层CdS薄膜。CdS是宽禁带半导体材料, 禁带宽度为2.42eV, 与CdTe结构相同, 有较好的晶格、化学和热膨胀匹配, 是CdTe基电池最佳的窗口材料。CdTe/CdS薄膜太阳能电池制备技术主要有化学水浴法、近空间升华法、电沉积法、真空蒸发法等。

CdTe薄膜电池属于多晶薄膜太阳能电池, 由于CdTe基电池结构简单, 转换效率较高, 成本相对较低, 成为近年来国内外研究的热点, 发展迅速。美国First Solar是全球为数不多且产能最大的碲化镉电池生产企业, 也是全球最大的薄膜电池生产商。2008年, 其产量达到500MW, 2009年产量达到1.1GW, 组件效率约11.1%, 每瓦制造成本约0.84美元。计划到2014年其碲化镉薄膜电池模块每瓦制造成本降到0.52~0.63美元, 转换效率提升至12.5%。然而, 未来制约CdTe薄膜电池发展的主要因素将是Cd和Te两种主要元素资源有限, 并且Cd是重金属, 有剧毒, Cd的化合物与Cd一样有毒, 在电池的制造、使用和回收等过程中, 会存在一定的安全问题。

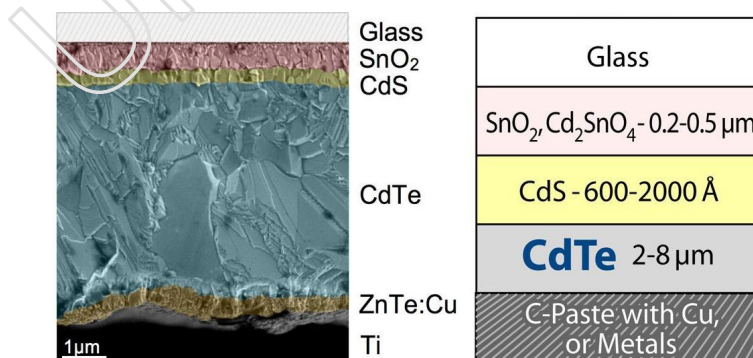


图7 碲化镉薄膜电池结构示意图

从图7的示意图可以看出, 碲化镉薄膜电池的结构与非晶硅薄膜电池相似, 只是没有本征吸收i层, CdTe层即为吸收层。通常结构为: 玻璃/TCO膜/CdS膜层/CdTe膜层/背接触层/金属背电极。CdTe禁带宽度为1.45eV, 光谱响应范围在380~850nm。对于玻璃基片, 其要求如同在非晶硅薄膜电池中所述, 同样超白浮法玻璃做玻璃基片, 并镀AR膜。而TCO膜通常用FTO膜, 不仅可以满足其光谱响应

范围内的高透过率，而且重要的是FTO膜能够满足碲化镉薄膜电池的生产工艺，尤其在近空间升华法和后续退火处理中的高温条件。

4.3 铜铟镓硒^[14-16]

铜铟镓硒（简称CIGS）薄膜太阳能电池是20世纪80年代后期开发出来的新型太阳能电池，其典型结构如图8所示。其中，CIGS作为吸收层是电池的关键材料，CIGS由CIS（铜铟硒CuInSe₂）发展而来，在CuInSe₂基础上，掺杂Ga元素，使Ga取代部分同族的In原子构成Cu(In, Ga)Se₂，所以简写为CIGS。通过调节Ga掺杂比例，可以改变CIGS的带隙，调节范围为1.04 eV到1.72 eV，这样可以优化禁带宽度，如当Ga取代30%In时，其禁带宽度约1.3eV，此时电池的性能最佳。CIGS薄膜的光吸收系数是已知半导体材料中最高的，超过10⁵cm⁻¹，并且它是一种直接带隙的半导体材料，适合薄膜化。美国可再生能源实验室制备的小面积CIGS薄膜电池的最高转换效率达到19.5%，大面积组件转换效率也达到约13%，是目前商业化薄膜电池中的最高效率。

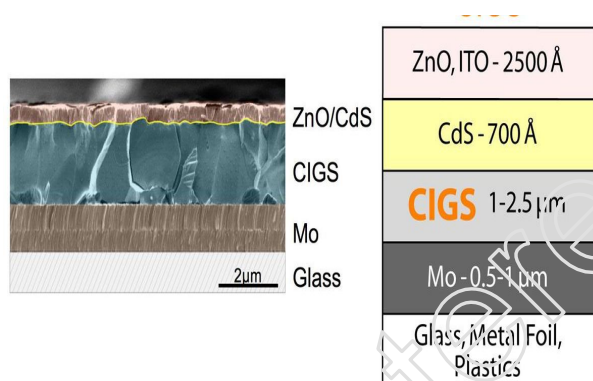


图8 CIGS薄膜电池结构示意图

因此，CIGS薄膜太阳能电池由于转换效率高、制作成本较低、没有性能衰减等特性而日益受到人们的广泛关注。但由于CIGS由四种元素组成，对元素配比敏感，由于多元晶格结构、多层界面结构、缺陷以及杂质等的存在增加了制备技术的难度，而且对设备的精度和稳定性要求较高，导致工艺的重复性差，高效电池的成品率低，因此目前还没有实现大规模工业化生产。目前，CIGS的制备方法主要为真空蒸发法、溅射法和电沉积法。

从图8所示的CIGS薄膜电池结构示意图发现，其结构与之前的非晶硅和碲化镉薄膜电池结构顺序刚好相反，相应的工艺顺序也相反。最底层的玻璃只是作为衬底支撑，并非一定要用玻璃，聚合物、金属箔、不锈钢等也可被用作衬底以制备轻便电池，不过通常以低廉的钠钙硅玻璃为衬底进行组件制作。玻璃作为衬底不存在高透光性的要求，所以用普通浮法玻璃即可。衬底上镀上Mo电极膜层，然后是CIGS吸收层，CdS层作为缓冲层和过渡层，最后在表面镀上一层导电膜做透明电极。因此，CIGS薄膜电池不需要用到镀好的TCO玻璃，其TCO膜层是在最好一道工序中完成。如果要做成电池组件，则还需要用EVA或PVB与超白压花玻璃盖板封装合片。

5 结语

随着世界能源需求的不断增长和不可再生资源（如煤炭、石油）的日益枯竭，以太阳能为代表的可再生能源将得到快速发展。本文介绍了目前市场主流的几种太阳能电池的结构和基本原理，并讨论了不同太阳能电池对光伏玻璃的不同要求。表3汇总了这几种电池的结构、禁带宽度、光谱响应范围以及对玻璃及TCO膜的要求。从中可以更加直观的看出，超白玻璃以其独特优异的光学性能在太阳能电池中广泛应用于玻璃盖板，此外薄膜电池不仅需要超白浮法玻璃和TCO膜，还需要用普通浮法玻璃作为电池底板。因此，太阳能电池这个新兴朝阳产业的快速发展，不仅大大提升传统玻璃行业的技术水平，拓展了玻璃的应用领域，而且还极大地促进了玻璃表面镀膜技术的发展。

表3 太阳能电池特性及对光伏玻璃的要求

电池种类		电池结构 (按光入射方向)	禁带宽度	太阳光谱 响应范围	光伏玻璃
晶体硅 电池	单晶硅/ 多晶硅	玻璃/EVA/电池片 /EVA/TPT底板	1.1eV	380~1200nm	AR膜+超白压花 玻璃
薄膜 电池	非晶硅/ 微晶硅	玻璃/TCO膜/非晶硅 pin层/微晶硅pin层 /金属背电极	非晶硅: 1.75eV; 微晶硅: 1.12eV	非晶硅: 380~ 780nm; 微晶硅: 380~ 1100nm	AR膜+超白浮法 玻璃+TCO膜
	碲化镉	玻璃/TCO/ CdS/ CdTe /金属背电极	1.45eV	380~850nm	AR膜+超白浮法 玻璃+TCO膜
	铜铟镓硒	玻璃/EVA/ TCO/CdS/ CIGS/Mo/衬底	1.30eV	380~950nm	AR膜+超白压花 玻璃

参考文献

- [1] 李俊峰, 王斯成, 等. 2007中国光伏发展报告. 北京: 中国环境科学出版社.
- [2] 李崇华. 太阳能电池工作原理与种类. 电气技术, 2009, 8: 128-130.
- [3] 格雷瑟. 大面积玻璃镀膜. 董强, 译上海交通大学出版社, 2006.
- [4] 鲁大学. 透明导电氧化物镀膜玻璃在光伏电池中的应用. 玻璃, 2008, 10: 33-37.
- [5] 望咏林, 颜悦, 沈玫. 透明导电氧化物薄膜研究进展. 材料导报, 2006, 5: 317-310.
- [6] 徐慢, 夏冬林, 赵修建. 透明导电氧化物薄膜材料及其制备技术研究进展. 材料导报, 2006, 11: 312~315.
- [7] 刘波, 赵小如, 冯嫄嫄, 等. 掺杂氧化锌薄膜的最新进展. 液晶与显示, 2009 (24): 522-527.
- [8] 赵汝强, 梁宗存, 李军勇. 晶体硅太阳电池工艺技术新进展. 材料导报, 2009 (23): 25-29.
- [9] 徐慢, 夏冬林, 杨晟, 赵修建. 薄膜太阳能电池. 材料导报, 2006 (20): 109-111.
- [10] 孔继川, 缪娟. 薄膜太阳能电池研究进展. 化工时刊, 2008, 7: 60-64.
- [11] 邹红叶. 硅薄膜太阳能电池的原理及其应用. 物理通报, 2009, 5: 56-57.
- [12] 沃银花. CdTe/CdS太阳能电池材料的研究进展. 材料导报, 2005 (19) 4: 31-34.
- [13] 李卫冯, 良桓, 张静全. CdTe太阳电池组件的关键技术研究. 中国科学E辑: 技术科学, 2007 (37) 7: 875-880.
- [14] 马光耀, 康志君, 谢元锋. 铜铟镓硒薄膜太阳能电池的研究进展及发展前景. 金属功能材料, 2009 (16) 5: 46-49.
- [15] 王希文, 方小红. 铜铟镓硒薄膜太阳能电池及其发展. 可再生能源, 2008 (26): 13-16.
- [16] 蒋方丹, 冯嘉猷. 铜铟硒薄膜太阳能电池的几个基础问题研究. 物理, 2006 (35): 957-960.

作者简介

万军鹏, 男, 1980年2月出生, 籍贯湖北省荆门市, 高级工程师, 工学博士, 博士后. 2008年5月毕业于武汉理工大学材料学院, 导师程金树教授; 2009年2月开始博士后研究, 属于信义玻璃与中国建筑材料科学研究总院联合培养, 导师顾真安院士. 主要从事太阳能玻璃、特种浮法玻璃、镀膜玻璃等相关新产品新技术的研究与开发, 已累计发表各类期刊文章10多篇. 工作单位: 信义玻璃控股有限公司 技术研发中心, 通讯地址: 广东省东莞市虎门镇路东信义玻璃工业园邮编: 523935. E-mail: wanjunpeng@xinyiglass.com