DOI: 10.12442/j.issn.1002-185X.20220962

异质结太阳能电池金属化技术研究进展

陈雷昊^{1,2},董一苇³,杨宏伟^{1,3},毛华明²,任宇³

(1. 昆明贵金属研究所,云南 昆明 650106)(2. 昆明贵研新材料科技有限公司,云南 昆明 650106)(3. 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室,云南 昆明 650106)

摘 要: 异质结太阳能电池具有光电转换效率高的优势,在光伏发电领域展现出了较大的发展潜力。低温金属化是制造异质结太阳能电池的一个重要工艺环节,用于在电池片上形成金属栅线电极,当前普遍采用低温固化型银浆结合丝网印刷来实现。然而,现有的低温银浆用量大、价格贵是导致电池成本较高的原因之一。因此,光伏行业正致力于改进和优化金属化工艺来降低银耗。本文综述了近年来异质结太阳能电池金属化技术的研究进展,详细总结了低温银浆各组分及固化工艺对浆料性能的影响,同时对金属化工艺降本增效的主要途径,包括银浆减量化方案例如多主栅、激光转印技术等,以及非银电极方案例如银包铜、铜电镀技术等,进行了介绍和对比,并对金属化工艺当前存在的挑战及未来发展方向进行了分析和展望。

关键词:异质结太阳能电池;金属化工艺;低温固化型银浆;银包铜浆料;铜电镀
中图法分类号:TM615⁺.2
文献标识码:A
文章编号:1002-185X(2024)01-0281-15

随着国家碳达峰、碳中和重要战略目标的提出, 光伏发电作为一种把太阳能直接转化为电能的方式, 具有环保和可再生的优势,是我国高质量发展绿色清 洁能源的重要方向之一。晶硅太阳能电池因其较为成 熟的技术、较高的光电转换效率和稳定性占据了光伏 市场绝大部分份额。传统的P型晶硅电池经历了不断 的技术发展,当前主流的发射极钝化与背面接触 (passivated emitter and rear cell, PERC)电池技术的 光电转化效率已逐渐逼近上限。因此,光伏行业开始 把目光投向N型晶硅电池,其中具有本征非晶硅薄膜 层的异质结(heterojunction with intrinsic thin layer, HJT)电池技术受到了广泛关注。HJT 电池相较 PERC 电池具有更高的理论转换效率,而且当前行业量产平 均发电效率也更优,因此较有潜力在将来替代 PERC

作为太阳能电池重要的上游行业,光伏浆料及其 金属化工艺的发展与之息息相关。电极金属化是制造 太阳能电池的其中一个重要工艺环节,即在电池片上 形成与基板紧密接触的金属栅线电极,其作用在于收 集和传导太阳能电池片表面的电流。光伏行业普遍采 用导电浆料结合丝网印刷的方式进行电极金属化工 艺,该技术成熟度较高^[2-3]。由于贵金属银具有较好的 导电性能且化学性质稳定,所以晶硅电池所使用的导 电浆料以银浆为主。银浆也是太阳能电池制造中除晶 硅片外成本占比最高的材料,其导电性能很大程度上 影响着电池的转换效率。

光伏银浆主要分为高温烧结型银浆和低温固化型 银浆,其二者的组分配方和金属化工艺有较大区别。 当前主流的 PERC 电池使用高温银浆,而 HJT 电池则 需使用低温银浆。由于低温银浆的导电性通常不如高 温银浆,而且 HJT 双面电池技术对低温银浆的使用量 更大,导致 HJT 电池制造成本被推高,当前仍然难以 对抗传统 PERC 电池的性价比优势^[3-4]。因此,如何大 幅减少低温银浆耗用量、降低 HJT 电池金属化工艺成 本,同时还能提高电池发电效率,成为了光伏行业亟 需解决的问题。本综述将从 HJT 电池低温银浆应用及 作用机理上出发,对当前开发的低温银浆主要配方组 成、各组分对浆料综合性能的影响及低温固化工艺等 的研究进展进行介绍,同时对近年来在 HJT 电池金属 化工艺环节降本增效的主要路径进行对比,分析相关 技术的优势及存在的挑战,并对未来 HJT 电池金属化 工艺发展方向进行展望。

收稿日期: 2023-01-09

基金项目:云南省科技计划项目基础研究专项(202201AU070188, 202201AT07259);云南省重大研发专项(202002AB080001-1, 202102AB080008);云南省万人计划-青年拔尖人才项目(2019020001);云南贵金属实验室科技计划(YPML-2022050201) 作者简介:陈雷昊,男,1988年生,博士,助理研究员,昆明贵金属研究所,昆明贵研新材料科技有限公司,云南 昆明 650106, E-mail: clh@ipm.com.cn

1 异质结电池及低温银浆应用

HJT 电池具有对称的双面结构 (图 1), 中间为 N 型单晶硅并经制绒清洗,然后在其正面通过等离子体 增强化学气相沉积法依次沉积本征非晶硅薄膜和 P 型 非晶硅薄膜,形成 P-N结,而后在单晶硅背面则依次 沉积本征非晶硅薄膜和 N 型非晶硅薄膜, 形成背表面 场。由于非晶硅的导电性不佳,因此再在电池两侧通 过物理气相沉积或反应等离子体沉积法分别沉积透明 导电氧化物薄膜(transparent conductive oxide, TCO) 来进行导电。TCO 材料主要有氧化铟锡(ITO)、铝掺 杂氧化锌(AZO)、钨掺杂氧化铟(IWO)等,TCO 导电层不仅可以减少收集电流时的串联电阻,还能起 到减反射的作用。最后通过丝网印刷技术将导电银浆 在 TCO 薄膜层上印制成"H型"的主栅及细栅格线, 并经低温金属化工艺固化形成双面接触电极^[3,5]。HJT 电池由于使用了钝化接触技术,即在电池结构中加入 非晶硅钝化薄膜层,可抑制光生电子与空穴的复合, 同时还可提高载流子选择性, 克服了 PERC 电池传统 接触下的转换效率限制^[6]。HJT 电池相比 PERC 电池 技术优势明显,主要表现在生产工艺流程简单、衰减 率低、温升损失低、双面率高、弱光效应高等^[3],因 此能够产生比 PERC 电池更高的光电转换效率。HJT 电池理论转换效率可达到 28.5%^[7],当前 HJT 电池量 产平均转换效率在 24%~25%^[2], 而隆基绿能科技股份 有限公司也创造了 26.8%的 HJT 电池全球最高转换效 率记录[8]。未来随着技术不断发展以及生产成本的降 低和良率的提升,N型电池将会在光伏发电领域占据 更重要的份额^[2,9]。

由于 HJT 电池是多薄膜层堆叠的结构特征,特别 是非晶硅薄膜层通常只有 10~20 nm 的厚度,如果金属 化工艺使用与 PERC 电池一样的高温银浆进行烧结, 则会对 HJT 电池薄膜结构造成非常大的损伤,导致载 流子寿命以及表面钝化质量的损失。因此,当前 HJT 电池金属化通常采用低温银浆在 200 ℃以下进行固化 成型银栅线电极,而低温固化在生产工艺上也将有助 于进一步减少能耗^[10-12]。

低温银浆的制备过程如图 2a 所示,首先将有机载 体在一定温度下搅拌均匀,然后与银粉通过均质搅拌 机充分混合,最后再经三辊研磨机轧制形成满足浆料 细度要求的均匀膏状物^[13-14]。制备好的低温银浆通过 丝网印刷工艺在电池片基底上形成栅线电路图形。丝 网印刷工艺即利用丝网图形部分网孔可透过浆料,而 非图形部分网孔不透过浆料的原理进行印刷。如图 2b 所示,印刷时刮胶推动浆料在丝网上移动使浆料填充



图 1 HJT 太阳能电池示意图和双面电池片上银栅线电极图形

Fig.1 Schematic diagram of HJT solar cell (a); image of H-pattern grids with Ag busbars, fingers and soldering tabs relevant for both the front and rear contacts of the cell (b)^[10]

网孔,同时施加一定压力使得丝网图形网孔处浆料与 电池片基底直接接触,而后刮胶朝丝网另一端移动, 在丝网恢复到初始位置过程中,浆料脱离网孔从图形 部分漏下,并保留在电池片表面指定位置^[15-16]。低温 银浆通过浆料中的树脂成分在固化炉中交联固化,将 栅线图形粘附在电池表面并与 TCO 导电层形成良好 的接触,最终制成 HJT 电池银栅线电极^[3]。

低温银浆导电机理主要包括渗流理论、隧道效应 理论和场致发射理论^[17]。如图 3a 所示,渗流理论认为, 低温银浆的导电性是依靠于导电填料银粉颗粒间的直 接接触,固化前导电填料分散于有机载体中,没有形 成直接接触,此时浆料不导电,在固化过程中,随着 温度的升高浆料中的有机溶剂不断挥发,使得有机载 体的体积不断收缩,导电填料开始相互接触,因而形 成导电通路。渗流理论还指出,导电浆料的电阻率 随着导电填料含量的增加而减小,当含量到达某一 临界值时电阻率出现急剧下降,这一临界值即为渗 流阈值^[18],因此导电填料含量需高于渗流阈值才能使 低温银浆形成导电通路。但实际上发现当导电填料含量 低于渗流阈值或导电填料间没有发生直接接触时,低温 银浆也可以导电。隧道效应理论和场致发射理论则是对 这种导电现象做出了进一步解释。如图 3b 所示,隧道





Fig.2 Schematic diagrams of Ag paste preparation process (a)^[14] and conventional screen printing process (b)^[15]



图 3 低温银浆作用机理示意图

Fig.3 Schematic illustrations of percolation theory (a)^[18], tunneling theory (b)^[19] and field emission theory (c) ^[20] for the mechanism of low-temperature Ag paste

效应理论认为,当导电填料银粉颗粒间搭接不够紧密 但间隔较小时,电子可以通过热振动在导电粒子间产 生跃迁,从而形成导电通路^[19]。另外,如图 3c 所示, 场致发射理论认为,当导电填料含量低于渗流阈值时, 若外加电压较高,导电粒子间则会存在强电场,此时 电子可以克服原子核的吸引力,直接跃迁穿过有机载 体的势垒,此时也可形成良好导电通路^[20]。

HJT 电池低温银浆是一种多组分复合体系,各组 分原料的选择、配比及固化工艺等都会对浆料的综合 性能产生重要影响。低温银浆经金属化工艺后形成的 银栅线电极不仅要保证与 TCO 导电层有高的粘附强 度和低的接触电阻,而且还要为电池的电流输出提供 高导通路^[3]。低温银浆性能表现很大程度上决定了 HJT 电池转换效率和电池性价比高低,因此,低温银 浆技术的突破对于 HJT 电池的产业化发展至关重要。

2 低温银浆组成及固化工艺

HJT 电池低温银浆组分构成包括银粉导电填料相、 聚合物树脂粘结相、有机溶剂、固化剂及其他助剂等。

2.1 银粉

银粉作为低温银浆的导电填料,一般占浆料的90% 左右,分散于有机载体中,起到传导电子、提供导电通 路的作用,决定了低温银浆的电性能。银粉的含量、微 观形貌及粒径尺寸在很大程度上影响银浆的导电性。相 比高温烧结型银浆,其金属化过程中银粉之间依靠表面 熔融相互连接形成非常良好的导电通路,低温固化型银 浆中银粉表面被有机树脂包覆不能直接接触,电子依靠 量子隧道效应从一个银粉单位转移到另一个银粉单位, 所以电导率通常低于高温烧结型银浆^[21-22]。银粉之间的 相对接触面积也是影响银浆电导率的一个重要因素,相 对接触面积越大、堆积密度越高,银浆体电阻率越低。 目前低温银浆中银粉粒径主要以超细亚微米颗粒为主, 形貌有球状、类球状、片状等^[23-24]。相对于球状银粉间 的点接触,片状银粉间为线接触或面接触,接触面积更 大, 且片状银粉间可以相互重叠、搭接, 在相同体积相 同配比的情况下,片状银粉电阻比球状银粉要小^[25]。 银粉尺寸选择也至关重要,银粉粒径越小,银浆内部结 构越致密且固化温度越低,但银粉尺寸过小时表面能较 大,容易发生团聚,影响其在有机载体中的分散性;当 银粉尺寸过大时,颗粒间空隙容易被有机载体填充,影响银浆导电性^[20]。

片状银粉和球状银粉混合使用可增加银粉间的接触 面积及堆积密度,获得的浆料导电性能比单独使用时的 更好。另外,若只使用片状银粉会导致浆料印刷性变差, 所以目前以片状和球状银粉复配使用居多^[26-27]。李燕华 等^[28]将 1.6 μm 片状银粉与 1 μm 球形银粉混合制备银 浆,发现银粉复配有助于提高粉体间的致密度,增加 银粉间的导电通路,显著提高银浆的导电性。Wang 等^[29]将不同粒径复配的球状银粉制成银浆,发现当粒 径为 2.94 和 0.59 μm 的复合银粉质量比为 85%/15% 时,银浆固化后的电极栅线具有致密和光滑的表面, 且与基材接触良好,其内部几乎没有任何孔洞,形成 了紧凑的微观结构和良好的导电通路。

另外,银纳米粉的添加可有效填充银粉间的空隙, 而且银纳米颗粒具有电阻率低、熔点低和表面能高 的特性,可使银浆在低温下进行快速固化,同时银 电极能获得较低的体电阻,且银层致密度高、附着 力好^[13,30-31],但前提是要能有效避免银纳米颗粒发生 团聚。Li等^[13]通过在低温银浆中加入 20%质量分数的银 纳米粉,发现银栅线电极电阻率可降低到 2.2 μΩ·cm, 同时若在银栅线和 ITO 层间利用喷墨印刷增加一层银 接触层,可几乎消除银粉和 ITO 层间的空隙,使得接 触电阻率降低至 0.55 mΩ·cm² (图 4)。

2.2 聚合物树脂

聚合物树脂作为低温银浆的基体粘结组分,经低 温固化后形成银浆的分子结构骨架,起到包覆和整体 粘结银粉的作用,并与 TCO 导电层粘结提供附着力, 因此决定了低温银浆的粘附强度、冲击强度和机械强 度等物理特性。聚合物树脂的分子量、含量和种类等 对低温银浆的耐弯折性、硬度、附着力和印刷适性会 产生较大的影响,同时还会对银粉在有机载体中的分 散性和银粉颗粒间的结合产生作用,从而直接或间接 影响银浆的导电性能^[32]。

通常树脂的分子量越高柔韧性越好,在固化过程 中更容易收缩形成致密的结构,银颗粒之间能够形成 更多的接触,容易发生电子跃迁,从宏观上表现为低 的电阻率。但是当分子量较高时,树脂收缩的空间有 限,银颗粒难以挤入树脂的间隙,可能导致导电率下 降^[33],因此在选择聚合物树脂时相对分子量应当适 中。树脂组分含量也会对银浆的性能产生影响,当树 脂含量过低时,浆料难以固化完全,不能形成导电通 路,导致电阻率增大且粘附程度也不佳;当树脂含量 过高时,固化后会在银颗粒表面形成一层绝缘膜,使 电阻率增大。

a Screen-printed Ag paste Voids b Screen-printed Ag paste ITO 2 µm

图 4 低温银浆固化后银粉与 ITO 层接触微观形貌

Fig.4 Cross-sectional SEM images of the contact interfaces between the ITO-coated Si wafer and the Ag grids without (a) and with (b) the inkjet-printed Ag contact layer^[13]

树脂种类方面,环氧树脂具有粘结性能优异、机 械强度高、耐热耐腐蚀性好、耐老化性好、寿命长、 化学稳定性好等特点,还可通过固化剂的选择实现快 速固化,而且环氧树脂无毒性,相比其他树脂更环保, 因此常用作低温银浆的树脂粘结相;但环氧树脂耐冲 击损伤性能差、柔韧性差、固化后产物会很脆,且大 部分环氧树脂的耐候性不佳^[34-35]。此外,聚氨酯、聚 酯树脂、丙烯酸树脂、酚醛树脂、氯醋树脂等也可作 为低温银浆的基体粘结组分[34]。聚氨酯具有优异的耐 氧、耐臭氧、耐低温以及抗紫外辐射性能,固化收缩 性较高, 耐弯折性能好, 对银粉有较好的润湿分散性, 电阻率较低,但大部分聚氨酯耐高温性一般,耐强极 性溶剂和耐强酸介质性能较差,而且聚氨酯的粘附强 度也没有环氧树脂高[34,36]。聚酯树脂制备的银浆虽然 有较强的附着力和较高的硬度,但浆料的导电性能一 般^[33,37]。丙烯酸树脂和氯醋树脂制备的银浆虽然电阻 率较低,但导电膜层的附着力较差^[34]。因此,在树脂 粘结相的选择上可采用多种聚合物树脂的复合体系或 针对特定性能要求对树脂材料进行改性,获得综合性 能优越的低温银浆。

2.3 有机溶剂

有机溶剂首先起到调节低温银浆粘度和流动性的 作用,使浆料具有良好的印刷性,防止出现断点、断 线或流淌现象。其次,在浆料固化过程中,溶剂的挥 发过程、热行为等对银颗粒的滑动、重排起着至关重 要的作用,它们直接影响固化后银浆的微观结构及综 合性能。此外,有机溶剂还可以溶解聚合物树脂,使 银粉在树脂中具有良好的分散性;改变基底的表面状 态,使浆料与基底有很好的润湿性;以及决定低温银 浆的固化温度和固化时间等^[38]。目前,酯类、醚类、 醇类和酮类等有机溶剂己经在导电浆料的制备过程中 得到了广泛的应用^[20]。

Li 等^[39]通过对不同有机溶剂制备银浆的研究发 现,溶剂种类和含量直接影响浆料粘度和流变性,粘 度太低印刷后浆料会发生流淌导致线形不好, 而粘度 过高又会使浆料无法印刷。同时有机溶剂的挥发性也 很重要,为了使银浆能在常温下储存,溶剂在此温度 下最好不挥发,而是在固化升温过程中能逐渐挥发, 让有机载体不断收缩,使银粉产生有效接触。但在金 属化过程中, 若溶剂挥发性较高, 在银浆中会产生气 泡,导致银栅线表面粗糙致密性不佳;若挥发性较低, 则需要使用较高的固化温度和较长的固化时间。汤森 进等^[40]认为以适合的比例混合搭配多种有机溶剂,可 调整溶剂挥发性并实现有层次的挥发,使得制备的银 浆性能更佳, 栅线致密且焊接拉力高, 从而电池能产 生更优的转换效率。此外,针对银浆所使用的树脂体 系,有机溶剂的匹配性也很重要。譬如,相关研究考 察酯、醚和酮等不同溶剂类型制备基于聚酯树脂体系 的银浆,发现当使用乙酸乙二醇乙醚溶剂时匹配性相 对较好,所制得银浆方阻低、抗挠折性好、附着力好、 稳定性高^[41]。另外,有机溶剂的热力学性及润湿性也 会影响浆料的性能。Zhang 等^[42]使用乙醚类溶剂 (CELTOL-IA)和乙二醇(EG)分别制备了银浆,并 研究了有机溶剂对银浆固化过程中热力学的影响。如 图 5a 所示,乙醚类溶剂制成的浆料在 140 ℃附近出现 的放热峰和乙二醇溶剂制成的浆料在 130 ℃附近出现 的吸热峰对应于有机溶剂的挥发。乙二醇在较低温度 下挥发时银颗粒表面温度降低,不利于固化过程中树 脂的收缩和银粉的排列,导致浆料内部结构出现一些 较大的孔洞或缺陷(图 5c 中箭头所示)。相比之下, 乙醚类溶剂的挥发相对稳定,为银粉的均质化和排列 提供了足够的时间,有助于银粉之间形成紧密的连接 (图 5b)。此外,乙醚类溶剂在银层上的润湿接触角 小于乙二醇(图 5d),说明了乙醚类溶剂对银粉具有 较好的润湿性。Nie 等^[14]也提出通过溶剂与导电填料、 电池片基底接触角的测量,可作为有机溶剂选择的有 效方法,接触角越小,则浸润性越好,此时制备出的 银浆性能表现较好。



图 5 有机溶剂对银浆固化过程中热力学、固化后微观形貌及 润湿性的影响

Fig.5 DTA thermal behavior (a); SEM images after curing for Ag pastes made of ether-type (CELTOL-IA) (b) and ethylene glycol (EG) (c) solvents; wetting angles of the CELTOL-IA and EG solvents on the Ag layer (d) ^[42]

总的来说,有机溶剂的选择应当与所用树脂体系 相匹配,能够较好地浸润银粉,并且在银浆固化过程 中可以顺利挥发和释放。另外,有机溶剂的挥发速度 不宜集中在较窄的温度范围,可以采用几种挥发性适 中且不一致的有机溶剂进行搭配组成混合溶剂,从而 具有一定的梯度挥发能力,以避免集中挥发导致固化 后银栅线电极出现孔隙和裂纹等缺陷,最终影响导电 性能^[43]。

2.4 固化剂及其他助剂

固化剂是低温银浆制备的重要添加剂,起到使热 固性树脂受热发生交联固化反应的作用。低温银浆常 用的环氧树脂本身为线性结构,需要与固化剂反应固 化后才能生成有实用价值的三维网状结构。环氧树脂 在固化时将固化剂分子引入本身分子结构中,使得三 维网络间的交联密度、形态、分子量发生变化,力学、 热学、电学等性能也随之发生改变,因而环氧树脂固 化后的性能很大程度上依赖于固化剂的种类。固化剂 按反应活性可分为潜伏型固化剂和显在型固化剂。显 在型固化剂与热固性树脂混合后易发生反应,室温储 存期较短故需要冷藏^[44]。而潜伏型固化剂与热固性树 脂混合后在常温条件下不起反应,仅在湿气、光照、 压力、热等条件触发下裸露出活性官能团部分与树脂 活性部分进行交联才可发生固化反应^[43]。低温银浆制 备倾向于采用潜伏型固化剂,以便能够在常温下较长 时间稳定储存。使用较多的潜伏型固化剂有改性双氰 胺类、胺类及改性胺类、阳离子潜伏型、咪唑盐及咪 唑衍生物类等^[45]。此外,固化剂的选取还需要考虑与 聚合物树脂和有机溶剂的匹配性,才能提升低温银浆 快速固化的效果。

低温银浆制备过程中根据实际性能需求通常还 会添加一些其他助剂。譬如,为了获得较大高宽比和 均匀性好的银电极栅线,通常会向银浆中加入一些触 变剂,以调整浆料的流变特性,使其具有高剪切稀化 性和快速恢复性,从而易于丝网印刷以及使印刷后浆 料保持良好的形态[46-47]。聚合物树脂与触变剂的相互 作用在控制浆料流变性能方面发挥着关键作用,进而 影响所印制栅线的质量^[48]。Qin 等^[46]研究了乙基纤维 素和改性氢化蓖麻油触变剂对银浆流体性能的影响, 发现加入触变剂的银浆屈服应力要远大于未加入触 变剂的银浆(图 6a)。屈服应力值反映了浆料内部网 络结构的强度,在未加触变剂时,银颗粒和聚合物之 间的相互作用较弱,导致屈服应力值较小,但随着触 变剂的加入,聚合物与触变剂胶束之间发生链缠结, 同时和分散在浆料中的银颗粒存在一定的缔合关系, 共同形成较强的银浆内部结构,呈现出较大的屈服应 力(图 6b)。另有研究发现,将触变剂和分散剂配合 使用可以很大程度上改善浆料的粘度、内部网络结构 和恢复性能^[46]。另外,硅烷偶联剂可以促进金属粉末 和有机载体之间的相容性,改善导电银浆的稳定性, 起到提高涂层与基层粘结强度、降低接触电阻、提高 树脂附着力的作用[41]。其他的添加剂例如分散剂可以 起到均匀分散粘结相和功能相、不出现团聚和沉淀、 改善润湿性的作用,而抗老化剂能起到提高树脂耐候 性的作用。

2.5 固化工艺

低温银浆的固化没有银粉烧结过程,银粉之间、 银粉与基材之间依靠树脂进行粘结,其过程包括溶剂 挥发、树脂体积收缩、银粉排列等^[49]。不同固化温度 和固化时间会对低温银浆固化后的电阻率和附着力等 性能产生一定的影响。Chen 等^[50]研究发现,随着固化 温度的升高,银栅线电极线电阻逐渐下降,而接触电 阻在 175 ℃时迅速下降但之后在更高温度下变化不 大;随着固化时间的增加,线电阻不断减小但在固化 60 min 以后变化不大。另外,随着固化温度的升高,



- 图 6 触变剂添加对银浆屈服应力的影响和在银浆内部与树脂 间发生链缠作用
- Fig.6 Effect of ethyl cellulose (EC) polymer with thixotropic agent on yield strength of Ag paste (a); internal structure model showing the interaction among constituents in Ag paste (b) ^[46]

银栅线电极对 ITO 层的附着力逐渐上升,在 200 ℃时 达到峰值,而固化时间的改变对附着力的影响不是很 大。龙孟等^[51]研究了固化温度对银浆固化膜的体电阻 率的影响,发现随着固化温度的升高,树脂体积收缩 越充分,溶剂挥发越完全,有机载体和银粉之间的连 接更加紧密,因此有利于导电通路的形成,使固化膜 的体电阻率降低。

通常,提高固化温度、延长固化时间有利于低温 银浆固化后性能的改善^[12];但在选择固化工艺时,应 把温度控制在 200 ℃范围内,防止温度过高对 HJT 电 池结构造成破坏。另外,在保证银浆固化后具有良好 电性能和力学性能的前提下,应尽可能降低固化温度 并缩短固化时间,以降低 HJT 电池的生产成本及提高 量产效率。

3 金属化工艺主要降本增效途径

HJT 电池金属化一般需要双面丝网印刷低温银浆,而且为保证导电性对银的固含量要求也比较高。由于贵金属银的价格波动明显,HJT 电池对银浆价格

及用量的变化也相当敏感。银浆的使用往往占电池制造非硅成本的一半以上,并且低温银浆一般需要低于室温保存,冷链运输需求也会进一步推高成本^[4]。2021年主流 PERC 电池正面银浆在 182×182 mm²(M10)尺寸电池片上消耗量约为 100 mg/片,而 HJT 电池双面低温银浆消耗量则达到约 230 mg/片^[2]。可见 HJT电池银浆耗用量是 PERC 电池的 2 倍多,这也是导致HJT 电池成本高的原因之一。作为新型高效光伏技术的 HJT 电池,如何减少银耗降低成本,使其能在将来占有更多市场份额,成为了行业亟待解决的问题。目前,HJT 电池金属化工艺在降低银耗的研发方面主要有两大路径:一是减少低温银浆的使用量,二是使用低成本金属替代贵金属银^[4]。

3.1 银浆减量化方案

尽管银浆在电池片上的使用量会受到电导率的要 求有最低限制^[52],但由于低温银浆金属化成本高的原 因,近年来银浆单耗已呈现逐渐下降的趋势^[2],同时 光伏行业也致力于通过印刷工艺优化改进来达到节省 银浆耗用量及降低成本的目的。

3.1.1 丝网印刷方式改进

丝网印刷银栅线的方式主要包括单次印刷、两次 印刷及分布印刷。单次印刷即主栅和细栅同时印刷, 由于其印刷工艺简单及良率高,为目前主流的丝网印 刷方式,但银浆需要同时兼顾焊接拉力及导电性,因 此提效空间有限并且浆料湿重也相对较高。两次印刷 即第一步先印刷细栅,第二步再主栅和细栅同时印刷, 通过二次叠印细栅增加栅线高宽比达到提升转换效率 的目的,但两次印刷精确对准难度大导致良率低,而 且使用银浆耗量更大,使得成本较高。分布印刷即主 栅和细栅分开印刷,虽然在主细栅连接处可能出现搭 接不好的问题,但其优势在于主栅银浆和细栅银浆可 根据不同性能要求分开设计[53]。细栅银浆注重导电 性,通过优化可达到提效目的,而主栅银浆注重焊接 拉力,因而可适当减少银浆固含量从而降低成本。研 究发现,在相同转换效率情况下,使用分布印刷所得 银栅线相比两次印刷能节省银浆约 57%^[54],而分布印 刷相比单次印刷也能使银耗降低约 15% [55]。由于两次 印刷银耗量大,其市场占比可能从当前的约10%不断 缩减到十年后的5%左右,而分布印刷因银耗更低的优 势,在未来十年将逐渐替代单次印刷,成为丝网印刷 的主流方式^[2]。

3.1.2 多主栅技术

为了减少金属栅格线的银耗,电池片上主栅数目 的研究一直受到行业的关注。光伏电池片从最早的 3 主栅技术逐渐发展改进为 5 主栅技术,而随着晶硅电 池片尺寸的不断变大,当前9主栅到12主栅技术已成 为主流,将来主栅数量超过12根的多主栅技术将会获 得更多的市场份额^[2]。通过增加电池主栅数量,连接 于主栅之间的细栅长度会缩短,同时主栅宽度变得更 细,细栅宽度和数目也会相应减小。提高主栅数目的 优势不仅可使得细栅上电流收集路径变短,减少电池 功率损失,从而提高转换效率,而且随着栅线有效长 度和宽度的缩短也将有利于银浆消耗量的下降,极大 地降低太阳能电池成本[56-57]。相关研究表明,5 主栅 设计相比3主栅正面总体银浆用量节省约15%^[58],而 12 主栅相比 5 主栅正面银浆用量节省可达 37%^[59], 另 外配置18根主栅的多主栅技术相比当前主流的9主栅 设计可使得细栅银浆消耗量减少4倍^[10]。HJT 电池需 要在双面印刷银栅格线,而多主栅技术的导入能使得 银浆消耗量的降低较为明显。在金属化工艺降本增效 途径中,目前多主栅技术为主流。

3.1.3 无主栅技术

近年来无主栅的新型互连技术被提出。由 Meryer Burger 公司研发并进行量产的智能栅网连接技术 (smart wire connection technology, SWCT)使得银浆 只需用于印刷太阳能电池片的细栅,这能极大地减少 银耗量,进而降低光伏组件的成本^[60]。利用 SWCT 技 术,太阳能电池片上传统的主栅和焊带被细铜线所替 代(图 7),这些铜线镀有低熔点合金焊料涂层(例如 铟锡或铋锡合金)并粘合到聚合物薄膜层上,以便于 直接层压到只印有银细栅的电池片上并进行焊接,因 此该技术可消除主栅和焊带对银浆的需求。研究发现, 使用 SWCT 技术相比传统银主栅金属化工艺可降低银 耗 85%以上^[60],在 156 mm×156 mm (M2)电池片上 无主栅技术正面银浆使用量只有 35 mg^[61]。此外, SWCT 技术使用低熔点焊料,也有利于应用到 HJT 电 池低温环境中^[5]。

然而,无主栅的 SWCT 技术也存在一些缺点。首 先,除了需铜线与聚合物薄膜复合并热压成串外,还 需将该线膜复合电极与相邻的两电池片头尾进行直接 互连(图 7a),增加了工艺复杂度,会导致良率的下 降。其次,若使用的聚合物薄膜透光性不佳,则会造 成较为严重的光学遮挡。另外,用于促进低温焊接的 铟锡或铋锡合金焊料涂层价格较高,从而推高镀层材 料成本。因此,目前 SWCT 技术产业化进展较慢。

3.1.4 激光转印技术

激光转印技术是一种新型的非接触式表面金属化 工艺,近年来在太阳能电池银浆印刷领域展现出降本 增效的较大潜力^[62]。激光转印技术主要包含填充过程 和转移过程两大步骤,如图8所示。首先在刻有沟槽



图 7 智能栅网连接技术设计和铜线与银细栅接触处形貌

Fig.7 Schematic diagram of smart wire connection technology (SWCT) enabling the direct interconnection with the wires of one cell front surface to the next cell back surface (a);
SEM image of the contact between coated Cu-wire and low-temperature Ag paste (b)^[60]



图 8 激光转印工艺流程

Fig.8 Schematic diagrams of pattern transfer printing: (a) filling process and (b) transfer process^[62]

形状的透明聚合物薄膜基底上,利用刮刀将银浆填满 到各个沟槽中,并刮除多余浆料使银浆表面与基底平 齐。然后将填充有浆料的聚合物基底翻转 180°,并将 电池片放置于正下方,通过红外激光束照射透明聚合 物薄膜,使其能量被银浆表面吸收,由此产生的热量 使处在浆料与沟槽界面区域内银浆中的有机溶剂成分 挥发,并在浆料与聚合物基底界面区域处形成高气压 层。当产生的气压超过银浆与聚合物基底之间的粘附 强度时,银浆就会从沟槽中释放出来并转移到电池片 表面,形成银栅线电极^[63-64]。

相比传统的丝网印刷工艺,激光转印技术的优势 主要表现在可以实现在太阳能电池片上印刷更窄线宽 及更优高宽比的银栅线图形,从而大幅节约银浆耗用 量。研究发现,激光转印技术制成的银栅线电极线宽 可做到 20 µm 以下, 高宽比超过 0.6, 正面银浆用量相 比丝网印刷节省超过 50%[64]。通过适当调整银浆的 屈服应力以及银浆与聚合物基底间的润湿性,可在更 低的激光功率下进一步减小栅线宽度和提高栅线高 宽比^[62]。同时,超细的栅线电极还可使得遮光面积降 低,从而提升电池的转换效率。另外,激光转印技术 还具有印刷高度一致性、均匀性优良的特征,在加工 过程中无需接触电池片表面,可以避免挤压式印刷存 在的破片、划伤、污染等问题。HJT 电池使用的低温 银浆粒径更小,激光转印可以达到更窄的线宽,而且 HJT 电池需要双面印刷银浆,对银浆耗用量改变更为 敏感,因此激光转印技术在 HJT 电池上有望产生更为 显著的降本增效效果。

然而,激光转印技术也存在一些需要解决的问题。 首先,激光转印具有较高的技术壁垒,需银浆与激光 功率达到较好配合,要进行长期的实验并积累工艺参 数。激光功率过低或不均,会使得银浆无法转移并残 留在沟槽内,导致断栅;而激光功率过高,又会引 起爆炸性转移,使得银浆喷出到表面上并在周围产 生一定量的碎屑,还会使印刷电极线形变宽影响高 宽比^[62]。其次,相比丝网印刷工艺,激光转印形成的 栅线电极附着力和焊接拉力较低。另外,激光转印的 印刷速度慢,而且聚合物薄膜基底成本较高、重复使 用次数有限。虽然激光转印技术在主流的 PERC 电池 上已有长时间论证,但目前在 HJT 电池上尚处于开发 前期,应用成本高,还需进一步验证。

3.1.5 钢板印刷技术

钢板印刷作为一种全开口的栅线印刷技术,也可 用于降低 HJT 电池低温银浆耗用量。常规丝网印刷使 用的网版采用金属丝托底,金属丝和网结会阻挡浆料 透过网版,因而开口率一般约为 60%,即便使用无网 结网版印刷,开口率也只能达到约 80%^[65]。而钢板印 刷的网版一般使用合金钢片通过加工手段形成均匀稳 定的栅线开口(图 9),在栅线开口处是无遮挡结构, 因此开口率可达到 100%,使得浆料能更顺畅地透过网 版,获得平整均匀的栅线^[66-67]。全开口的钢板印刷可 使细栅线宽控制到 20 µm^[10],从而优化栅线高宽比, 进而提高电池转换效率。研究发现,在制造相同转换 效率电池的情况下,钢板印刷相比常规丝网印刷正面 银浆使用量可节省超过 25%^[66]。但钢板印刷通常不支 持"H型"栅线设计,所以主栅和细栅无法同时印刷, 因此一般采用分布印刷的方式^[67]。

3.2 非银金属化方案

金属化工艺降本增效的另一条可行路径就是通过使 用低成本的贱金属部分或者全部替代贵金属银,从而使 得银耗大幅降低甚至无需使用银材料。银具有优秀的导 电性能,常温下电阻率为1.65 μΩ·cm,而铜是导电性能 仅次于银的贱金属,常温下电阻率为1.75 μΩ·cm^[68]。但 铜的价格只有银的约 2%,且铜的供给量相比银受到的 限制更小^[4],因此,铜成为了可替代银用于 HJT 电池 金属化工艺的最佳低成本材料。

3.2.1 银包铜技术

银包铜金属化技术主要是通过在铜粉表面包覆银 粉形成导电功能相,并加入树脂粘结剂、溶剂及添加 剂等有机载体,经过混合研磨等工艺,制备成银包铜 导电浆料,并通过主流丝网印刷技术印制成银包铜栅





Fig.9 Optical microscopic images of stencil (a) and conventional mesh screen (b)^[66]; finger profiles measured with a profilometer using stencil (c) and mesh screen (d)^[67] 线电极。银包铜浆料技术的关键在于导电性好及可靠 性高的银包铜粉的研发及制备。由于铜粉本身不稳定, 在室温下容易氧化,通过采用表面处理技术在铜颗粒 上沉积适量的银层覆盖铜粉,形成外壳为银内核为铜 的银包铜复合金属粉体材料(图 10),可用于消除铜 粉容易氧化的缺陷,从而提升银包铜粉的抗氧化性和 导电性^[69-71]。另外,使用价格更低的铜粉部分替代银 粉,可降低银含量以控制 HJT 电池低温浆料制造成本。 当前行业内开发的银包铜浆料技术可替代约 30%~ 50%的银^[72-73]。

制备银包铜粉主要采用的方法包括置换反应法和 还原反应法。置换反应法通常会先将铜粉进行预处理 清洗以去除表面的氧化物和杂质,然后采用硝酸银或 银络合液滴入铜粉悬浮液中,在铜粉表面发生银离子 与铜原子的置换反应(Cu+2Ag⁺→Cu²⁺+2Ag)并沉积 出银颗粒层^[70-71,74]。但置换反应法形成的镀银层可能 会存在孔隙,使得包覆不完全,导致内核的铜发生氧 化影响导电性能。Shin等^[69]通过添加抗氧化剂硫氰酸 钾对置换反应制备的银包铜粉进行表面处理制作硫氰 酸盐保护层,发现镀有保护层的银包铜粉包覆效果较 好,在 500 ℃下有很好的热稳定性且不易氧化。还原 反应法一般采用还原剂例如葡萄糖、抗坏血酸、酒石 酸等,还原硝酸银形成银纳米颗粒层(Ag⁺+e→Ag) 并沉积在铜粉表面^[75-78]。还原反应法制备的银包铜粉 包覆率更高,从而具有更优的抗氧化性,形成的银包





Fig.10 SEM image (a), EDS line profile (b), TG-DSC results (c) during dynamic heating of Ag-coated Cu particles^[71]

铜电极电阻率稳定^[77-78]。银包铜粉内核铜颗粒的尺寸 根据浆料的使用需求一般在百纳米到微米级别,而沉 积在铜表面上的银颗粒大小为 30~150 nm^[70,76],外壳 银层包覆厚度范围通常在 100~400 nm^[69-71]。虽然随着 银层包覆厚度的增加抗氧化性会增强,但银耗量也随之 上升,因此银包铜粉需要在降本增效上权衡银含量。Tian 等^[79]制备出了极小尺寸的纳米银包铜浆料,在 57 nm 铜 粉上沉积平均粒径约 7 nm 银颗粒,发现极小纳米尺寸 可形成更紧密包覆以消除空隙,不仅使抗氧化性能得 到改善,可长达 2 个月保存,而且银包铜浆料烧结温 度可降低到 70 ℃下。

银包铜粉在低温下不容易被氧化,如图 10c 所示, 含银 40%的银包铜粉起始氧化温度在 220 ℃以上^[71]。 而 HJT 电池栅线电极通常在 200 ℃下固化,其低温工 艺可以抑制铜的氧化,因此银包铜浆料可用于替代低 温银浆;但在传统的 PERC 电池高温金属化工艺中银 包铜浆料容易氧化失效,较难导入替代高温银浆。为 了保证低温浆料的稳定性及导电性,银包铜粉还会与 银粉以适当的比例进行复配使用。Nakamura 等^[72]采用 银包铜粉和银粉复配制得银包铜浆料,当银包铜与银 的混合比为 63%/37%时,所制成的 HJT 电池比起用纯 银浆制成的电池转换效率差别仅为 0.4%,但电池电极 成本相比下降约 30%。

银包铜浆料在 HJT 电池上具备降本增效的可行 性,具有替代低温银浆的潜力。但当前该技术还有可 进一步研究改进的方向,包括铜粉表面有效预处理以 提升银沉积效果、控制银沉积过程以达到高包覆致密 性、提高银铜壳核结构结合强度以保证调浆过程不脱 离、优化银包铜粉表面有机处理以提升与有机载体相 容性、以及改善银包铜浆料热稳定性和耐候性等。 3.2.2 铜电镀技术

铜电镀与丝网印刷技术最主要的区别在于沉积 TCO导电层之后的金属化工序,传统丝网印刷通过在 TCO导电层上印刷导电浆料并固化成型栅线电极,而 铜电镀是一种无压力接触式的电极金属化技术,其在 TCO导电层上通过电解还原铜离子的方法在表面沉 积金属铜制成铜栅线电极^[80-81]。使用铜电镀技术获得 的 HJT 电池栅线电极可消除对贵金属银的依赖,实现 贱金属铜的完全替代方案。而且铜电镀金属化技术可 在 200℃下完成,满足 HJT 电池制造所需的低温工艺。 此外,铜电镀技术制成的电极栅线致密均匀且宽度可 低至 20 μm 以下^[80,82],更窄的线宽可获得更大的高宽 比,减小遮光损失,降低体电阻率,从而有效提升电 池转换效率^[81,83]。利用双面铜电镀工艺制成的 HJT 电 池发电效率可达到 25.1%^[84]。

铜电镀工艺制备 HJT 电池电极一般由 5 个步骤组 成,如图11所示,包括:(1)在TCO导电薄膜层上沉 积金属种子层;(2)制作图形化掩膜层形成指定的栅线 电极开口;(3)在掩膜开口处进行铜电镀;(4)剥离图 形化掩膜层;(5)刻蚀去除多余金属种子层^[81,83,85]。由 于铜和 TCO 导电层之间的附着力不好,一般无法直接 在 TCO 薄膜层上镀铜, 所以会先通过物理气相沉积或 磁控溅射在 TCO 层上沉积一层厚度为 100 nm~1 um 的金属种子层,然后再在种子层上进行铜电镀,以增 强铜栅线电极和 TCO 层之间的粘附接触^[80,86-87]。可用 于制备金属种子层的材料包括铜、镍、银、铬、钛以 及金属合金等,其中银种子层展现出最低的接触电阻 和最佳的附着力,但由于银的使用成本高,考虑到性 价比, 镍种子层的使用更多^[86,88-89]。HJT 电池铜电镀 过程主要使用直接电镀或光诱导镀的方法制成铜栅线 电极,此外还会在铜栅线表面上再镀一层几百纳米厚 的银或锡保护层,用以防止铜电极被氧化以及起到作 为钎焊层进行焊接的作用^[82-83,86,88,90]。

在掩膜层上进行图形化工艺形成电极开口是铜电 镀工艺的重要步骤,主要的方法有通过旋涂液体光刻 胶并利用光刻法曝光显影成型开口掩膜^[80],通过压膜 机将干膜感光胶层压到基底上并曝光显影成型开口掩 膜^[83],通过丝网印刷感光紫外油墨或感光胶并曝光显 影成型开口掩膜^[83,91],通过喷墨印刷技术将功能性油 墨图形喷印到光刻胶表面上并经过热处理形成开口掩 膜^[82]等。但有机掩膜一般成本较高,因此无机材料例 如铝原生氧化物^[90]、氧化铝及非晶硅^[92]等也被用于制 作掩膜层以降低制造成本。





Fig.11 Conventional copper plating process for HJT solar cell^[89]

然而以上图形化工艺方法基本都需要在 HJT 电池 基底上全区域沉积金属种子层和掩膜层,这不仅会增 加材料成本,而且在铜电镀后还需去除多余的种子层 和掩膜层,使得工艺复杂。Yu等^[87]使用丝网印刷银栅 线作为种子层,再沉积一叠氧化硅或氮化硅介电膜作 为电镀掩膜,在200℃下银浆穿透介电膜,使得后续 铜电镀只会选择性地在银栅线种子层上进行。Hatt 等^[93]报道了在 ITO 层上先沉积一层铝薄膜, 而后再通 过喷墨印刷活性银油墨形成栅线图形的种子层,之后 铜电镀可选择性地只覆盖在栅线种子层上。但使用银 栅线作种子层的方法无疑又会增加银耗。Rodofili等^[94] 开发出了一种基于激光诱导转移的方法在 HJT 电池上 进行铜电镀。首先在 TCO 薄膜上沉积一层介电膜, 然 后通过激光将镍钒合金从一塑料薄膜上转移到介电膜 表面形成电极图形种子层,而后再次利用激光将镍钒 种子层穿透介电膜并与 TCO 层接触,最终在图形化种 子层上完成选择性铜电镀。通过在电镀开口位置选择 性沉积种子层的工艺,可避免在 TCO 层上全区域覆盖 种子层以节约材料成本,而且还可消除后续需刻蚀多 余电镀掩膜和种子层的步骤,简化铜电镀过程,同时 可避免在刻蚀移除过程中引入缺陷。

虽然铜电镀技术可实现几乎完全替代贵金属银, 并且导电性及转换效率较丝网印刷低温银浆工艺更 优,但当前铜电镀使用还存在一些难题^[4,81,95]。首先, 铜电镀制备流程需要至少五道工序,即使改进简化为 选择性电镀工艺,但相比传统丝网印刷只需一道工序, 铜电镀技术制备工艺更为复杂,导致良率下降、规模 化量产要求难以满足。其次,更多的电镀工序会使得 相关制造设备的投资增加,导致最终铜电镀技术总体 成本未必能有效降低。再有,铜电极的长期使用稳定 性和可靠性还有待进一步验证。虽然金属种子层及 TCO 薄膜层可作为壁垒防止铜向晶硅内部扩散, 但若 TCO 层不能完全覆盖晶硅片或者电镀过程中引入缺 陷没能有效阻隔,则会使铜较容易发生扩散,进而导 致电池片或组件失效。而且铜栅线易氧化,氧化后会 影响自身导电性以及附着力下降导致脱栅,难以满足 太阳能电池组件使用长达 25 年以上的寿命要求。另 外,铜电镀工艺会产生有机污染物和废水,规模化量 产需解决环评的问题。因此,铜电镀技术若要实现规 模化使用,还需从制备工艺、设备产能、使用寿命及 环保处理等方面进行改进优化。尽管面临许多挑战, 但在光伏行业降本增效诉求下,铜电镀技术仍然是 HJT 电池金属化工艺未来较有前景的发展方向。

3.2.3 铜浆技术

使用导电铜浆通过丝网印刷在 TCO 薄膜层上形

成铜栅线电极是另一降本方法。铜浆不仅可以实现铜 完全替代银,而且使用丝网印刷技术相比铜电镀技术 工艺流程更简单、生产工艺成本更低,可达到材料及 工艺成本同时降低的目的。然而,铜较为活跃其抗氧 化性能不佳,虽然低温金属化条件有利于减小铜浆的 活跃度,但固化过程以及长期暴露在环境中使用,仍 然可能使铜栅线电极形成不导电的氧化铜,最终影响 电池发电效率及使用寿命。

为了解决铜易氧化的问题, Yoshida 等^[96]开发了一 种低温固化型铜合金浆料,由导电铜粉、低熔点合金、 热固性聚合物及有机溶剂等组成。低熔点合金可在 140℃左右发生融化并与铜粉粘附,从而防止铜粉氧化, 该铜合金浆印制成的栅线电阻率最低可达约 30 μΩ·cm。 Chang 等^[97]研发了一种抗氧化导电铜浆,其中导电相使 用铜纳米粉并在表面上包覆了一层约 5 nm 厚的聚乙烯 吡咯烷酮 (PVP), 起到防止铜纳米粉氧化的作用, 在 280℃的氮气环境下进行固化成型后,铜栅线电极可在 空气环境下放置六个月未发生氧化。Teo 等^[98]通过提高 抗氧化导电铜浆固含量到 86%,并在 400 ℃的真空环 境下进行固化成型,铜栅线电阻率可低至 27 μΩ·cm, 与 ITO 层接触电阻率低至 0.4 mΩ·cm²。但为了防止铜 浆在固化过程中被氧化,需要使用还原性气氛例如氮气 或真空进行金属化,增加了工艺复杂度,而且为了获得 低电阻率需要较高的固化温度,这也较难满足 HJT 电 池制造通常 200 ℃以下低温工艺要求。

由于铜的电阻率高于银,如果用铜浆制作电池栅 线电极,为了能达到与银浆所制成的栅线相同的导电 性能,那么铜栅线需要具有更大的横截面积,这也将 会增加电池片的遮光面积从而导致光学损失增大,影 响电池转换效率^[10]。在晶硅电池片上使用铜浆还有可 能会导致铜原子渗透进入晶硅片,对载流子寿命造成 不利影响,使得电池片性能退化及组件失效^[99]。另外, 铜易氧化脱栅线,导致在 TCO 层上附着力不佳,长期 使用稳定性还有待验证。

4 挑战与展望

当前太阳能光伏发电技术仍然以 PERC 电池为主, 虽然新型 HJT 电池具有更高的转换效率,但其相对 PERC 电池还不具备性价比优势,量产规模仍较小,目 前在太阳能电池技术市场占比不到 3%。但随着光伏技 术的不断发展,行业预测 HJT 电池的生产制造成本有 望与 PERC 电池进一步缩小,HJT 电池量产平均转换效 率也将会从当前约 24%不断提升至十年后约 26%,届 时 HJT 电池技术在国内市场占比有望超过 30%,而在 全球光伏电池技术市场份额也将能接近 20%^[2,9]。

低温银浆用量大是 HJT 电池制造成本较高的原因 之一,因此在电池金属化工艺环节中如何降本提效是 当前重要的研究方向和亟需解决的技术关键。在使用 纯银电极方面,目前多主栅印刷技术成为了降本增效 的有效途径。另外,减小细栅线宽或增大细栅间距也 可有助于降低银浆耗用量以及减少遮光损耗,但若细 栅过窄或细栅间距过大则可能会增大细栅线电阻及接 触电阻,所以细栅化设计需要在银浆耗量、遮光损耗 和电阻损耗之间作出权衡。通常窄线宽会伴随着多主 栅技术同时使用,以抵消由于细栅银耗减少而增加的 电阻损耗^[2,10]。同时丝网印刷速度也需逐步提升,以 缩短电池片印刷耗时,提高量产效率。此外,无主栅 的 SWCT 技术以及激光转印技术的导入可使得银耗能 更大程度地减少,而且形成的细栅线型更平整致密且 线宽更窄,但新技术在 HJT 电池上应用还需对可靠性 做进一步验证,相关的制造工艺设备还有待改进以简 化工艺流程及降低总体制造成本。

在非银电极金属化工艺方面,当前银包铜浆料结 合丝网印刷技术相较铜电镀技术更为成熟,降本效果 也更为明显。但银包铜浆料技术仍存在一些挑战,其 中银包铜粉需要银层对铜颗粒进行完全包覆且均匀致 密,银铜界面结合紧密保证调浆过程不剥离,银层包 覆尽量不存在孔隙避免在固化温度下被氧化。铜电镀 技术虽然可实现对银的完全替代方案,但当前铜电镀 工艺流程相较传统丝网印刷工艺复杂且电镀设备使用 也会增加成本,导致铜电镀技术在金属化环节总体降 本效果有限。利用铜替代银的金属化技术若要在将来 获得更广泛应用,前提是必须解决铜金属化后电极栅 线的可靠性以及附着力等关键技术问题,同时生产设 备和制备工艺还要能满足高性价比规模化量产要求。

2021 年全球光伏新增装机再创历史新高达到 173 GW^[2],全球光伏行业直接消耗了约 3223 吨银,相当于 全球银供给量的 11.4%^[100]。为了实现 2050 年全球碳中 和的目标,作为清洁可再生能源的光伏发电在未来还将 有更大的增长,届时将会达到每年 TW 级别的光伏产能。 考虑到全球银的总供给量,为使光伏技术可持续发展, 有关测算建议银耗目标应当降低到 2 mg/W^[10,101]。当前 HJT 电池双面银耗约 27 mg/W,预测未来 10 年有望降至 约 15 mg/W^[2],但与光伏可持续发展的银耗目标仍有距 离。因此,在 HJT 电池金属化工艺上,虽然目前多主栅、 细栅化和银包铜技术路线成熟度更高、降本效果较为明 显;但随着相关技术的发展,HJT 电池金属化降本增效 的最终解决方案可能是采用无主栅的 SWCT 技术以及 激光转印技术使低温银浆只用于细栅且线宽更窄,甚至 是使用铜电镀技术,最终使得银耗能降为零。

5 结 语

当前的 HJT 电池低温银浆金属化技术正致力于进 一步优化浆料配方设计、降低电阻率、减小印刷栅线 宽度、提高印刷速度等,同时在固化工艺方面逐步降 低固化温度以及减少固化时间,从而提升量产性和降 低银浆制造成本,并使电池转换效率获得提高。然而 低温银浆用量大、价格贵是 HJT 电池成本较高的原因 之一,光伏行业正通过印刷工艺改进优化以及替代贵 金属银的非银电极方案来降低银耗。目前多主栅技术、 细栅化印刷及银包铜技术的应用在降本效果上更为明 显、技术相对更为成熟,但为了更大程度地降本增效 及实现光伏可持续发展的目标,将来最终的解决方案 可能是无主栅技术、激光转印技术及铜电镀技术的应 用。可以预见,随着对 HJT 电池低温金属化工艺技术 研发的不断投入, 高效 HJT 电池生产成本将会与传统 PERC 电池差距逐步缩小,有望真正开启 HJT 电池技 术的高性价比量产时代。

参考文献 References

- Schmidt Jan, Peibst Robby, Brendel Rolf. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2018, 187: 39
- [2] Fischer Markus, Woodhouse Michael, Herritsch Susanne et al. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2021 Results 13th Edition[R]. Frankfurt: VDMA, 2022
- [3] De Wolf Stefaan, Descoeudres Antoine, Holman Zachary C et al. Green[J], 2012, 2(1): 7
- [4] Louwen Atse, van Sark Wilfried, Schropp Ruud et al. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2016, 147: 295
- [5] Benda Vítězslav. Crystalline Silicon Solar Cell and Module Technology[M]. London: Academic Press, 2018: 181
- [6] Allen Thomas G, Bullock James, Yang Xinbo et al. Nature Energy[J], 2019, 4(11): 914
- [7] Long Wei, Yin Shi, Peng Fuguo et al. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2021, 231: 111291
- [8] Green Martin A, Dunlop Ewan D, Siefer Gerald et al. Progress in Photovoltaics: Research and Applications[J], 2023, 31(1): 3
- [9] Wang Shijiang(王世江), Jiang Hua(江 华), Wang Qing(王青) et al. China PV Industry Development Roadmap (2021-2022)(中国光伏产业发展路线图(2021年版))[R]. Beijing: China Photovoltaic Industry Association, 2022
- [10] Zhang Yuchao, Kim Moonyong, Wang Li et al. Energy & Environmental Science[J], 2021, 14(11): 5587

- [11] Jeffries April M, Mamidanna Avinash, Ding Laura et al. IEEE Journal of Photovoltaics[J], 2017, 7(1): 37
- [12] Li Xin, Dong Hongyu, Guo Shaoqing et al. Applied Sciences[J], 2020, 10(14): 4857
- [13] Li Yuanming, Kim Hee-Soo, Yi Junsin et al. IEEE Journal of Photovoltaics[J], 2018, 8(4): 969
- [14] Nie Ting, Cui Chunting, Ma Shenghua et al. ACS Applied Electronic Materials[J], 2021, 3(2): 861
- [15] Tepner Sebastian, Wengenmeyr Noah, Ney Linda et al. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2019, 200(2): 109969
- [16] Hsu Chien P, Guo Rong H, Hua Chi C et al. Journal of Polymer Research[J], 2013, 20(10): 277
- [17] He Lili(贺丽丽), Ye Mingquan(叶明泉), Han Aijun(韩爱军). Materials Reports(材料导报)[J], 2008, 22(S2): 294
- [18] Yang Jiangao(杨建高), Liu Chengcen(刘成岑), Shi Kai(施 凯). Chemical Intermediate(化工中间体)[J], 2006, 2:13
- [19] de La Roche Saint Andre Matthieu, Rieger Laura, Hannemose Morten et al. IEEE Signal Processing Letters[J], 2017, 24(3): 254
- [20] Zhan Haijiao(詹海娇). Research and Application of Low Temperature Conductive Silver-based Pastes(低温导电银基 浆料的研究与应用)[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019
- [21] Liu Wenping(刘文平), Qin Haiqing(秦海青), Lin Feng(林峰) et al. Electronic Components and Materials(电子元件与材料)[J], 2014, 33(9): 30
- [22] Ghosh Dinabandhu, Dasgupta Samudra. Metallurgical and Materials Transactions B[J], 2008, 39(1): 35
- [23] Yoo Byungwook, Kim Youngmin, Han Chul Jong et al. Applied Surface Science[J], 2018, 429: 151
- [24] Guo Shaoqing(郭少青), Dong Yi(董 弋), Sun Wanxing(孙万兴) et al. Journal of Functional Materials(功能材料)[J], 2020, 51(11): 11042
- [25] Zhou Zongtuan(周宗团), Zuo Wenjing(左文婧), He Xuan(何 炫) et al. Journal of Xi'an Polytechnic University(西安工程 大学学报)[J], 2019, 33(5): 538
- [26] Park Bum-Geun, Jung Kwang-Ho, Jung Seung-Boo. Journal of Alloys and Compounds[J], 2017, 699: 1186
- [27] Sun Wanxing(孙万兴), Guo Shaoqing(郭少青), Dong Yi(董 弋) et al. Materials Reports(材料导报)[J], 2021, 35(S1): 402
- [28] Li Yanhua(李燕华), Zuo Chuan(左 川), Liang Yun(梁 云) et al. Precious Metals(贵金属)[J], 2019, 40(3): 27
- [29] Wang Hanying, Tai Yuping, Li Ruixiao et al. RSC Advances[J], 2016, 6(34): 28289
- [30] Chen Dongpo, Zhao Lei, Diao Hongwei et al. Journal of

Alloys and Compounds[J], 2015, 618: 357

- [31] Xiong Nana(熊娜娜), Wang Yuehui(王悦辉), Li Jingze(李晶泽). Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(10): 2589
- [32] Jiang Bin(蒋 斌). Study on Low Temperature Cured Silver Paste Used in Membrane Switch(低温固化导电银浆的研究 与应用)[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012
- [33] Lim Chan Kyu, Lee Yo Seb, Choa Sung Hoon et al. International Journal of Polymer Science[J], 2017, 2017: 1
- [34] Xing Qisi(幸七四), Li Wenlin(李文琳), Huang Fuchun(黄富春) et al. Precious Metals(贵金属)[J], 2013, 34(2): 26
- [35] Li Sen(李 森), Jin Lifu(金理福), Xu Wei(许 巍) et al. Journal of East China University of Science and Technology (华东理工大学学报)[J], 2015, 41(6): 787
- [36] Jiang Bin(蒋斌), Li Xinxin(李欣欣), Han Zhewen(韩哲文). Paint & Coatings Industry(涂料工业)[J], 2012, 42(5): 68
- [37] Liu Chang, Fu Qiangang, Zou Jizhao et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2016, 27(6): 6511
- [38] Zhou Yingying, Tong Hua, Liu Yujie et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2017, 28(7): 5548
- [39] Li Ruixiao, Wang Hanying, Tai Yuping et al. RSC Advances[J], 2016, 6(49): 43732
- [40] Tang Sengjin(汤森进), Peng Shuai(彭 帅), Zou Wen(邹 文). Journal of Functional Materials(功能材料)[J], 2016, 47(11): 11072
- [41] Liu Chang(刘长). Effect of Solvent and Resin Molecular Weight on the Performance of Low Temperature Curing Silver Pastes(不同溶剂和树脂分子量对低温固化导电银浆 的性能影响)[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016
- [42] Zhang Hao, Li Wanli, Gao Yue et al. Journal of Electronic Materials[J], 2017, 46(8): 5201
- [43] Lin Tao(林 涛). The Preparation and Property Study of Low-temperature Sintered Silver-based Paste for Solar Cell(太阳能电池用低温固化银浆的制备及性能研究)[D]. Changsha: Central South University, 2014
- [44] Wang Jinxia(王锦霞). Preparation of Imidazole Derivatives as Latent Curing Agents for Epoxy and Their Application in Electronic Encapsulation Adhesives(咪唑类环氧树脂潜伏型 固化剂的制备及其在电子灌封胶中的应用)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017
- [45] Sun Xin(孙 鑫). Study on Synthesis and Application of Imidazole-type Latent Curing Accelerator for Epoxy

稀有金属材料与工程

Resins(咪唑型环氧树脂潜伏性固化促进剂的合成与应用研究)[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021

- [46] Qin Jun, Zhang Weijun, Yang Jinchao et al. Materials Science Forum[J], 2019, 956: 12
- [47] Phair John W, Lundberg Mats, Kaiser Andreas. *Rheologica Acta*[J], 2009, 48(2): 121
- [48] Murakami Setsuaki, Ri Kinki, Itoh Toshio et al. Ceramics International[J], 2014, 40(1): 1661
- [49] Chen Zhibo(陈志波). Study on Preparation of Ultrafine Silver Powder and Curing Technology of Low Temperature Cured Silver Paste(超细银粉的制备及低温固化银浆固化工 艺的研究)[D]. Changsha: Central South University, 2012
- [50] Chen Dongpo, Zhao Lei, Diao Hongwei et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2014, 25(6): 2657
- [51] Long Meng(龙 孟), Gan Weiping(甘卫平), Zhou Jian(周 健) et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2017, 22(4): 481
- [52] Green Martin A. Progress in Photovoltaics: Research and Applications[J], 2011, 19(8): 911
- [53] Hannebauer Helge, Dullweber Thorsten, Falcon Tom et al. Energy Procedia[J], 2013, 38: 725
- [54] Hannebauer Helge, Dullweber Thorsten, Falcon Tom et al. Energy Procedia[J], 2013, 43: 66
- [55] Kšnig M, Deckelmann M, Henning A et al. Energy Procedia[J], 2012, 27: 510
- [56] Braun Stefan, Hahn Giso, Nissler Robin et al. Energy Procedia[J], 2013, 43: 86
- [57] Braun Stefan, Nissler Robin, Ebert Christian et al. IEEE Journal of Photovoltaics[J], 2014, 4(1): 148
- [58] Nicolai Massimo, Zanuccoli Mauro, Magnone Paolo et al. Energy Procedia[J], 2015, 77: 129
- [59] Chen Xiping(陈喜平), Huang Wei(黄纬), Wang Xiaofei(王肖飞) et al. Acta Energiae Solaris Sinica(太阳能学报)[J], 2020, 41(12): 132
- [60] Faes A, Despeisse M, Levrat J et al. Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Amsterdam: EU PVSEC, 2014: 2555
- [61] Papet P, Andreetta L, Lachenal D et al. Energy Procedia[J], 2015, 67: 203
- [62] Adrian Adrian, Rudolph Dominik, Lossen Jan et al. Coatings[J], 2021, 11(1): 108
- [63] Lossen J, Matusovsky M, Noy A et al. Energy Procedia[J], 2015, 67: 156
- [64] Adrian Adrian, Rudolph Dominik, Willenbacher Norbert et al.

IEEE Journal of Photovoltaics[J], 2020, 10(5): 1290

- [65] Zhang Y, Zhang L, Jiang L et al. 7th Workshop on Metallization and Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells[C]. Konztanz: Metallization & Interconnection Workshop, 2017: 1
- [66] Shanmugam Vinodh, Wong Johnson, Peters Ian Marius et al. IEEE Journal of Photovoltaics[J], 2015, 5(2): 525
- [67] Hannebauer H, Falcon T, Cunnusamy J et al. Energy Procedia[J], 2016, 98: 40
- [68] Kasap Safa, Koughia Cyril, Ruda Harry E. Electrical Conduction in Metals and Semiconductors[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 19
- [69] Shin Jongmin, Kim Hyunju, Song Kwang Ho et al. Chemistry Letters[J], 2015, 44(9): 1223
- [70] Chiang Chen-Su, Wu Yia-Ming, Lee Wen-Hsi. Journal of Nanoscience and Nanotechnology[J], 2018, 18(4): 2716
- [71] Choi Eun Byeol, Lee Jong-Hyun. Applied Surface Science[J], 2019, 480: 839
- [72] Nakamura Kyotaro, Muramatsu Kazuo, Tanaka Aki et al. Proceedings of the 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Brussel: EU PVSEC, 2018: 704
- [73] Schube Jörg, Fellmeth Tobias, Jahn Mike et al. AIP Conference Proceedings[C]. Konztanz: AIP Publishing, 2019, 2156: 020007
- [74] Wu Min, Lin Baoping, Cao Yi et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2013, 24(12): 4913
- [75] Sun Hongpeng, Wang Kaijun, Cai Xiaolan et al. Advanced Materials Research[J], 2013, 750-752: 1057
- [76] Chen Kuan-ting, Ray Dahtong, Peng Yu-hsien et al. Current Applied Physics[J], 2013, 13(7): 1496
- [77] Choi Eun Byeol, Lee Jong-Hyun. Journal of Alloys and Compounds[J], 2016, 689: 952
- [78] Huang Hui(黄 惠), Zhou Jiyu(周继禹), Fu Renchun(付仁春) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料 与工程)[J], 2014, 43(2): 490
- [79] Tian Yanhong, Jiang Zhi, Wang Chenxi et al. RSC Advances[J], 2016, 6(94): 91783
- [80] Geissbuhler Jonas, Wolf Stefaan De, Faes Antonin et al. IEEE Journal of Photovoltaics[J], 2014, 4(4): 1055
- [81] Yu Jian, Li Junjun, Zhao Yilin et al. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2021, 224(8): 110993
- [82] Li Zhongtian, Hsiao Pei-Chieh, Zhang Wei et al. Energy Procedia[J], 2015, 67: 76
- [83] Yu Jian, Bian Jiantao, Liu Yucheng et al. Solar Energy[J], 2017, 146: 44

- [84] Adachi Daisuke, Hernández José Luis, Yamamoto Kenji. Applied Physics Letters[J], 2015, 107(23): 233506
- [85] Adachi Daisuke, Terashita Toru, Uto Toshihiko et al. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2017, 163: 204
- [86] Lee Sang Hee, Lee Doo Won, Kim Han Jun et al. Materials Science in Semiconductor Processing[J], 2018, 87: 19
- [87] Yu Jian, Zhang Liping, Chen Tao *et al. Solar RRL*[J], 2019, 3(3): 1800261
- [88] Aguilar Antony, Herasimenka Stanislau Y, Karas Joseph et al. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)[C]. Portland: IEEE, 2016: 1972
- [89] Limodio Gianluca, De Groot Yvar, Van Kuler Gerwin et al. IEEE Journal of Photovoltaics[J], 2020, 10(2): 372
- [90] Hatt Thibaud, Kluska Sven, Yamin Mananchaya et al. Solar RRL[J], 2019, 3(6): 1900006
- [91] Khanna Ankit, Ritzau Kurt-Ulrich, Kamp Mathias et al. Applied Surface Science[J], 2015, 349: 880
- [92] Dabirian A, Lachowicz A, Schüttauf J W et al. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2017, 159: 243
- [93] Hatt Thibaud, Mehta Vivek P, Bartsch Jonas et al. AIP

Conference Proceedings[C]. Lausanne: AIP Publishing, 2018, 1999: 40009

- [94] Rodofili Andreas, Wolke Winfried, Kroely Laurent et al. Solar RRL[J], 2017, 1(8): 1700085
- [95] Lennon Alison, Colwell Jack, Rodbell Kenneth P. Progress in Photovoltaics: Research and Applications[J], 2019, 27(1): 67
- [96] Yoshida Manabu, Tokuhisa Hideo, Itoh Uichi et al. Energy Procedia[J], 2012, 21: 66
- [97] Chang Weichen, Weng Liwei, Chuang Chikai et al. Journal of Nanoscience and Nanotechnology[J], 2016, 16(9): 9125
- [98] Teo Boon Heng, Khanna Ankit, Shanmugam Vinodh et al. Solar Energy[J], 2019, 189: 179
- [99] Lindroos Jeanette, Savin Hele. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2016, 147: 115
- [100] Asahi Refining, International Depository Services Group, CIBC Capital Markets *et al. World Silver Survey 2022*[R]. Washington: The Silver Institute, 2022
- [101] Verlinden P J. Journal of Renewable and Sustainable Energy[J], 2020, 12(5): 53505

Research Progress on Metallization Technologies for Heterojunction Solar Cells

Chen Leihao^{1,2}, Dong Yiwei³, Yang Hongwei^{1,3}, Mao Huaming², Ren Yu³

(1. Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

(2. Kunming Guiyan New Material Technology Co., Ltd, Kunming 650106, China)

(3. State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Kunning 650106, China)

Abstract: Heterojunction solar cells have the advantage of high cell efficiency and show great potential in the field of solar photovoltaics. Low-temperature metallization is an important process in the manufacturing of heterojunction solar cells, which is used to form metal grids on the cell surface. Currently, low-temperature-cured silver paste combined with screen printing is widely used. However, the high consumption of expensive low-temperature silver paste is one of the reasons for the high cost of the cells. The photovoltaic industry is working hard to improve and optimize metallization process to reduce silver consumption. This paper reviewed the research progress on metallization technologies for heterojunction solar cells, and summarized in detail the effect of the components of low-temperature silver paste as well as the curing process on the overall performance. In addition, the main metallization approaches used to increase cell effectiveness were introduced and compared, including silver paste reduction strategies such as multi-busbar and pattern transfer printing technologies, and non-silver metallization strategies such as silver-coated copper and copper plating technologies. Finally, the challenges of different metallization processes for heterojunction solar cells were analyzed and their future development directions were also prospected.

Key words: heterojunction solar cell; metallization process; low-temperature-cured silver paste; silver-coated copper paste; copper plating

Corresponding author: Yang Hongwei, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, P. R. China, E-mail: nanolab@ipm.com.cn