



毛细悬浮液正面银浆制备与丝网印刷助力晶硅太阳能电池降本提效

赵石凯,杨志骞,洪家琪,胡凯祥,刘贤哲,陈毅湛*

(五邑大学应用物理与材料学院,广东 江门 529020)

摘要: 随着传统能源的不断消耗,可再生绿色能源已成为当前社会发展的主流。太阳能作为一种可再生的清洁能源,具有低成本、清洁环保等优势,被广泛应用于各领域。晶硅太阳能电池是目前可量产的高效电池,其中正面银浆是关键组成部分,直接影响电池效率。目前,通常采用丝网印刷工艺用银浆制备电极栅线。然而,银浆中含有的多种添加剂会对电池性能产生影响。利用毛细管悬浮液理论对正面银浆的制备及应用进行探索,通过材料表征、流变性分析和丝网印刷,研究了毛细管悬浮液的形成及组分配比对银浆流变性能和栅线形貌的影响。粘度测试结果显示,不同比例组分对毛细悬浮液银浆的流变性和丝网印刷的电极栅线形貌有显著地影响。采用丝网印刷工艺,利用毛细悬浮液银浆制备出平均宽度为 $28.62\ \mu\text{m}$ 、平均高度为 $10.53\ \mu\text{m}$ 、高宽比为0.37的栅线。相比传统银浆体系,毛细悬浮液银浆中减少了添加剂的使用,烧结后杂质残留更少,电极线电阻减小,提高了太阳能电池的转换效率。电性能模拟结果显示,与传统银浆体系相比,毛细悬浮液银浆使太阳能电池的填充因子(FF)提高0.15%、光电转化效率(η)提高0.03%。本研究为光伏行业的提效降本提供了一种新的可行性方案。

关键词: 可再生能源;绿色能源;太阳能电池;正面银浆;毛细悬浮液;流变测试;丝网印刷;提效降本
中图分类号: U271.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9981(2024)04-0613-07

引文格式: 赵石凯,杨志骞,洪家琪,等. 毛细悬浮液正面银浆制备与丝网印刷助力晶硅太阳能电池降本提效[J]. 材料研究与应用,2024,18(4):613-619.

ZHAO Shikai, YANG Zhiqian, HONG Jiaqi, et al. Capillary Suspension Front Silver Paste Preparation and Screen Printing to Enhance Cost Efficiency of Crystalline Silicon Solar Cells[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(4): 613-619.

0 引言

太阳能是一种可再生能源,目前全世界都将其视为重要的清洁能源。化石能源的高污染及总储量的快速下降,为太阳能的大规模应用提供了舞台。太阳能主要围绕光热、光化学和光伏的形式开展使用,太阳能电池以光生伏特原理为基础实现光电转换^[1]。市场上太阳能电池包括晶硅电池、薄膜电池、钙钛矿电池等^[2-3],主流太阳能电池以晶硅电池为主,使用浆料制成的栅线电极可将光电转换生成的电流收集导出。当前,行业内多以银浆作为晶硅电池正面导电栅线的制作材料。对于正面导电栅线来说,自身底面积造成的遮光会降低电池的电流密度,直接影响太阳能电池的效率^[4-6]。此外,导电栅线与电池片之间形成的接触电阻及自身电阻会对电流的

收集和传导造成损失,进而影响成品电池的光电转换效率^[7]。导电栅线自身电阻大小主要受使用的银浆影响,如银浆流变与丝网印刷的匹配、印刷栅线的致密程度及烧结后栅线内是否含有杂质等。目前,晶体硅太阳能电池正面导电栅线电极正朝着精细化、大高宽比方向发展,这要求导电银浆应具有与电池相匹配的流变性能^[8-10]。传统正面导电银浆主要由有机载体、添加剂(如分散剂、粘合剂、触变性剂)、导电相银粉和无机玻璃粉粘结剂组成^[5-6,11]。由于传统正面导电银浆中有碳杂质残留,且其制备工艺较为繁杂,需要加热溶解多种聚合物添加剂。因此,Erin等^[12]于2011年提出了一种基于毛细管力形成的悬浮结构。悬浮结构是通过添加少量与主体有机载体不混溶的次级流体,产生了毛细管力并引起小

收稿日期:2023-12-29

基金项目:江门市科技计划项目(2019030100060009187);五邑大学校企合作项目(HX2023)

作者简介:赵石凯,硕士研究生,研究方向为导电浆料。E-mail:1016505794@qq.com。

通信作者:陈毅湛,博士,副教授,研究方向为高转化效率太阳能电池、新型柔性银电子浆料及3D打印材料和器件。

E-mail:yizhanchen@126.com。

规模团聚,从而创建了颗粒间的液-桥网络。毛细管结构主要分为毛细管状和摆桥状,这取决于两相液体对固体颗粒的浸润性(如浸润优先级和接触角度)。这类网络结构经烧结后无碳杂质残留,可在相对较大的范围内改变银浆的流变性能,使银浆从弱弹性到高弹性,甚至到凝胶态的转变^[13]。与目前商业导电银浆相比,毛细悬浮液体系银浆的最大优势是结构可恢复性。传统商业导电银浆的老化问题取决于聚合物添加剂的降解性,降解后聚合物的结构遭到破坏而无法恢复,由此导致传统导电银浆样品的性能也不能轻易恢复。使用毛细悬浮液结构制备银浆,当周围环境温度较高($>30\text{ }^{\circ}\text{C}$)时会影响体系内部二次相液体挥发而导致网络结构崩塌,但在重新加入适量的二次相液体后样品的毛细结构逐渐恢复,银浆的性能也接近初始配制状态^[14]。另外,一般的储存温度为 $10\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$,不会影响银浆的长期稳定性,因为二次液体在此温度下仍被有机流体包裹而不会挥发。聚合物添加剂在印刷剪切过程中,由于自身含有高分子长链,受外力剪切时不易拉伸,限制了银浆的流变能力,导致在印刷过程中堵塞印刷网板^[15]。因此,使用毛细悬浮液体系时应减少聚合物添加剂的使用,这不仅能在更大范围内调整银浆的流变能力,以满足更多的应用条件,而且还可以更加匹配丝网印刷,从而得到形貌良好的导电栅线。

针对传统银浆工艺较为复杂,以及银浆中含有聚合物添加剂和烧结后有杂质残留等问题,本文基于毛细悬浮液结构,结合毛细管理论,对全新的有机溶剂体系制备毛细悬浮液结构银浆进行了探究,以达到减少高分子添加剂的使用、简化制备工艺、降低栅线电极体电阻及提高短路电流密度、提高太阳能电池的光电转换效率的目的。

1 实验部分

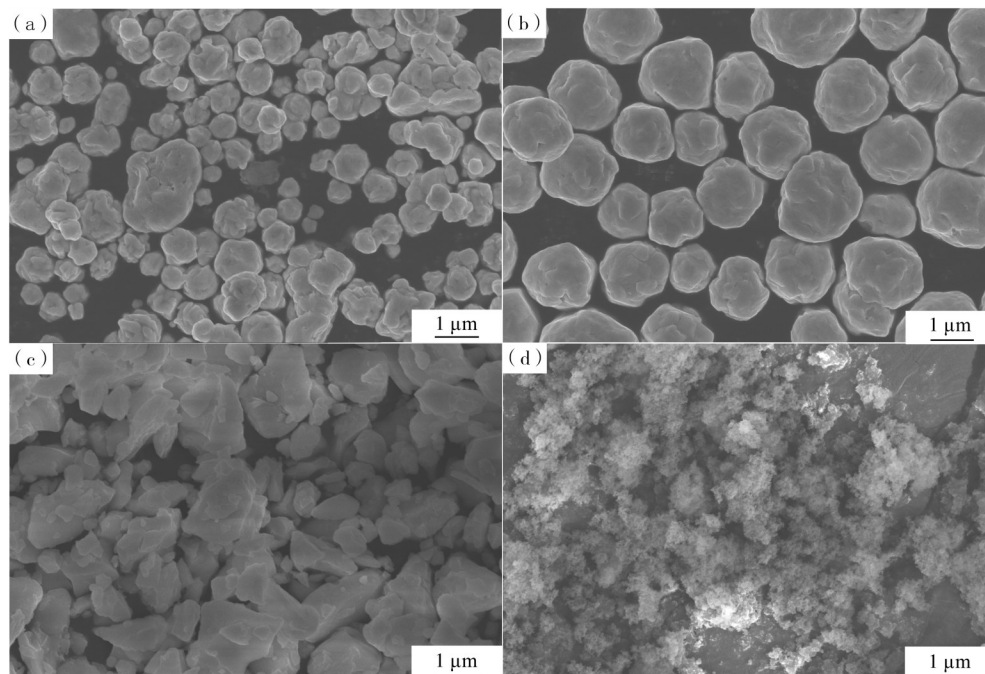
1.1 实验原材料

实验原料:球形银粉,分别由日本DOWA生产和湖南国银新材料有限公司生产;铅系无机玻璃粉,由广州柯尚新材料科技有限公司生产;松油醇、甘油、邻苯二甲酸二丁酯、聚酰胺蜡、丁基卡必醇、乙基纤维素,均为分析纯,由上海麦克林生化科技股份有限公司生产;硅烷偶联剂KH570、卵磷脂,均为分析纯,由北京伊诺凯科技有限公司生产。由于项目要求,下文中涉及到的溶剂仅以溶剂1等名称进行表达。

1.2 材料表征与选择

1.2.1 材料的表征

目前,银浆主要以球形银粉为主,使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)表征观察粉体的形状、表面形貌度和团聚情况(见图1)及粒径分析情况(见表1)。



(a)—银粉A;(b)—银粉B;(c)—玻璃粉a;(d)—玻璃粉b。

(a)—silver powder A;(b)—silver powder B;(c)—glass powder a;(d)—glass powder b.

图1 固体粉末SEM表征图

Figure 1 SEM images of silver powder A, silver powder B, glass powder a and glass powder b

表1 不同粉体信息表
Table 1 Information of different powders

粉体种类	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)
银粉A	0.80	1.30	2.00	0.63
银粉B	1.04	1.55	2.31	0.50
玻璃粉a	0.53	0.86	1.58	2.88
玻璃粉b	0.21	0.47	1.60	2.29

1.2.2 材料的选择

银粉颗粒粗糙度会导致毛细悬浮液中液-桥的数量、形状及毛细力的变化,颗粒之间的摩擦接触也会影响毛细管悬浮液的强度。毛细管悬浮液的屈服应力是由粒子数密度、粒子的横截面积和二次流体的体积分数决定的,粒径接近的粉体在溶剂中更易形成稳定的毛细结构^[16-17]。所以,选取平均粒径接近的两种粉体银粉A和玻璃粉a作为毛细悬浮液的固相粉末。由于毛细悬浮液还受到溶剂性质的影响^[18],所以需对不同溶剂进行混溶、接触角测试及热重测试。根据毛细悬浮液理论,作为载体的有机溶剂应为两相不混溶的液体。对不同的有机溶剂进行混溶并选取满足毛细管理论的一组体系作为载体。将不同的有机溶剂经过匀质机(中毅,ZYMC-580H)进行混合,在转速 $1\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下持续混合60 s,观察各组溶剂的混合状态。其中,溶剂1与溶剂2充分混溶,静置一段时间后仍保持混溶状态。将溶剂1与溶剂3混合后出现明显的浑浊,并且在容器底部出现不混溶液球,静置一段时间后出现分层并呈现不混溶状态。溶剂2与溶剂3的混合情况与溶剂1与溶剂3混合的情况相同。结合以上结果,将溶剂1作为主相1,将溶剂2作为主相2,两者可以互换,而将溶剂3作为二次相。将单主相的溶剂与二次相的溶剂混合,虽然可以形成毛细悬浮结构,但单主相的分散性、触变性等不能满足银浆的要求。综合考虑,选择使用有分散剂、触变剂的双主相体系,这样银浆不仅可以具备较好的流变性,还可以有效地分散粉体,提高银浆的触变性。

银浆的溶剂载体应具有流动性,并在烧结过程中尽可能的全部挥发,这样可以使导电栅线具有更好的致密性和导电性。此外,溶剂的挥发温度应远低于固体粉末的熔化温度,为保证溶剂挥发时不会造成银浆结构的坍塌,要求溶剂的挥发温度需具有层次性,即不能集中在相同温度下大规模的挥发^[19-20]。基于挥发性的要求,针对所需溶剂进行了2次热重测试,数据拟合结果如图2所示。从图2可见,主相1溶剂在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右开始挥发,主相2和二次相溶剂在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 左右开始挥发。不同的挥发起始

温度有利于印刷后栅线形貌的保持,并且少量二次相溶剂的缓慢挥发可以保持毛细结构的稳定性,这也有利于银浆的长时间存放^[21]。

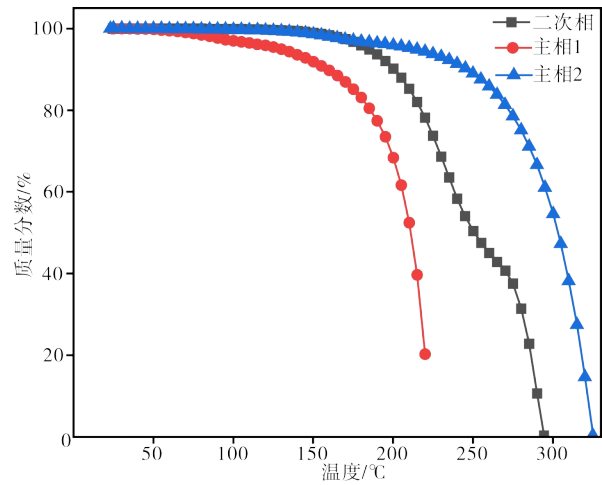


图2 溶剂热重测试

Figure 2 Solvent thermogravimetric testing

根据毛细悬浮液理论,作为载体的有机溶剂需要不相混溶的两相液体,并要求液体浸润性有区别。当主相液体优先浸润粉体时,银浆会形成毛细管状结构;当二次相液体优先浸润时,银浆会形成摆桥状结构^[12]。相比摆桥结构银浆,毛细悬浮结构银浆有更广的流变范围,所形成的毛细力也更强。通过两者在实验中的流变粘度对比,选择制备的银浆为毛细悬浮结构。悬浮结构的形成取决于溶剂对粉体的接触角度。对目前满足混溶性的体系进行了接触角度的测试,3次接触角测试取平均值,结果列于表2。由表2可知,溶剂1和溶剂2与银粉的接触角度均小于 90° ,溶剂3的接触角度大于 90° 。结果表明,溶剂1和溶剂2比溶剂3更容易浸润银粉。测试过程中还发现,溶剂1和溶剂2接触后会在几秒内浸润粉体,而溶剂3则在粉体表面维持液球状。虽然在银浆制备过程中有玻璃粉的加入,但质量分数仅为1%—3%,加入量相比银粉来说是少量的,故忽略其对浸润性的影响。

表2 粉体与溶剂接触角度测试结果

Table 2 Contact angles between different powder and solvent

溶剂类型	左接触角度/ $^\circ$	右接触角度/ $^\circ$
溶剂1	40.19	40.34
溶剂2	51.29	51.71
溶剂3	140.23	140.00

基于对粉体的观察、溶剂的混溶性测试和固-液接触角度的测试,最终选择溶剂1和溶剂2作为主相溶剂,溶剂3作为二次相溶剂。

1.3 银浆制备与丝网印刷

首先,将满足毛细悬浮液结构的溶剂体系和粉体放入同一容器中,使用匀质机在 $1\ 200\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下持续混合 60 s,得到初期银浆。然后,使用三辊磨机(中毅,ZYTR-80)进行二次混合,旨在将银浆内形成的团聚体碾磨破碎,使银浆均匀性和分散性更好。最后,再次使用匀质机在转速 $1\ 200\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下持续混合 60 s,旨在排除使用三辊磨机时可能产生的气泡。把所制备的银浆涂敷在丝网印刷网板一端,使用半自动丝网印刷机(迈为,MX-XPTA1,网板开口宽度 $18\text{--}35\ \mu\text{m}$)进行丝网印刷。正式印刷前需先在PV板进行预印刷,在保证可良好印刷出栅线后,使用开口宽度 $25\ \mu\text{m}$ 的网板将银浆印刷在硅电池片上。

1.4 理论基础

毛细管力在很多自然现象及工业技术中起着重要的作用,其由液体内部的拉普拉斯压力和作用在固-液-气接触线上的表面张力组成。由液桥连接的两个固体颗粒间的毛细力 F_c 取决于粉体颗粒的半径 r 、分离距离 S 、液体的表面张力 Γ 、三相接触角 θ 及液体桥的体积 V ,其可通过拉普拉斯-杨氏方程(见式(1))求解^[13],式中 $\hat{S} = S\sqrt{\frac{r}{V}}$ 。

$$F_c = \frac{2\pi r\Gamma\cos\theta}{1 + 1.05\hat{S} + 2.5\hat{S}^2} \quad (1)$$

为了提高太阳能电池的光电转换效率,栅线电极要有较小的宽度和合适的高宽比,以此来增加对太阳光线的吸收。栅线电极的形貌与银浆粘度有直接的联系,银浆粘度(见式(2))可通过屈服应力 σ_y 来表示^[17]。

$$\sigma_y = f(\phi)\frac{\Gamma}{r^2} = f(\phi)\frac{2\pi\Gamma\cos\theta}{r} \quad (2)$$

由式(2)可知,银浆的屈服应力除受毛细力影响外,还受粉体颗粒比例函数 $f(\phi)$ 的影响。银浆内的毛细力和银浆屈服应力均与粉体颗粒的半径 r 成反比,与表面张力 Γ 和接触角 θ 成正比。选择粒径相似的微米级银粉和玻璃粉,以及使用不同表面张力 Γ 和不同接触角 θ 的溶剂,可以对银浆内的毛细力进行调整。选择合适的溶剂,可以在较大范围内调节银浆的粘度和屈服应力。所以,溶剂体系的构建对制备丝网印刷用的银浆至关重要。

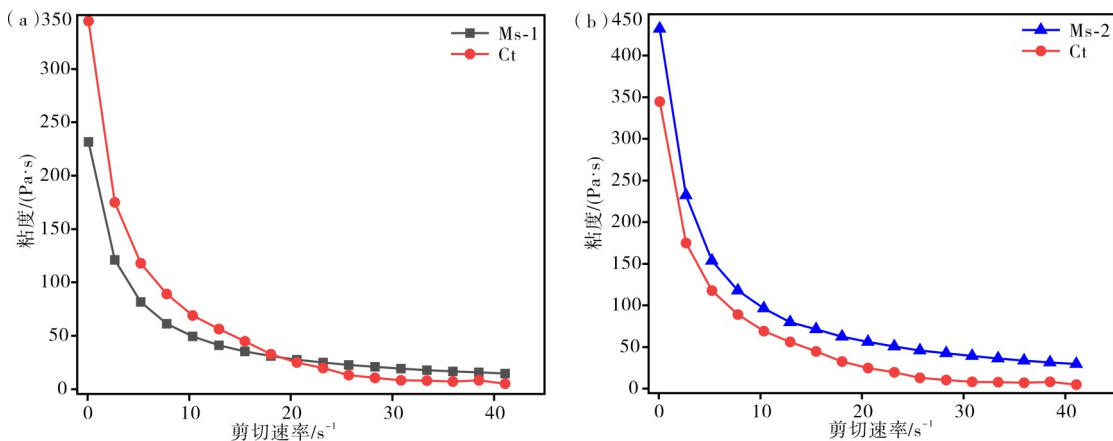
2 分析与讨论

利用平板流变仪(哈克,Mas-60),对传统体系和毛细悬浮液体系银浆的流变-粘度及不同有机配比下毛细悬浮液银浆的流变-粘度进行测试和对比。丝网印刷后,使用3D显微镜(美能,ME-PT3000),对栅线的几何参数进行表征。同时,针对栅线的几何参数进行电性能模拟。

2.1 与传统体系的对比

银浆在丝网印刷过程中,在剪切力、拉应力等作用下微观结构随时间的变化发生明显的破坏和变形,导致其粘度迅速减小,从而产生流动及变形。因此,通常要求银浆在低剪切状态下应具有较高的粘度。

针对毛细悬浮结构银浆(Ms-1、Ms-2)和传统体系银浆(Ct)进行粘度测试并分析对比,其中固相含量和有机载液占比相同。由于毛细体系银浆中仅含有机溶剂而无高分子添加剂,因此对比时只考虑是否含有添加剂(聚酰胺蜡、乙基纤维素等)。图3为毛细体系银浆与传统体系银浆粘度对比结果。从图



(a) 银浆 Ms-1 与银浆 Ct 的粘度对比; (b) 银浆 Ms-2 与银浆 Ct 的粘度对比。

(a)—comparison of viscosity between capillary suspension silver paste Ms-1 and traditional system silver paste Ct;

(b)—comparison of viscosity between capillary suspension silver paste Ms-2 and traditional system silver paste Ct.

图3 毛细体系银浆与传统体系银浆粘度对比

Figure 3 Comparison of viscosity between capillary system silver paste and traditional system silver paste

3(a)可以看出,在低剪切速率下与传统体系银浆相比,毛细体系银浆 Ms-1 的初始粘度更低,但是当剪切速率超过 20 s^{-1} 后,其则表现出了更高的粘度。这是由于在较低的剪切速率下,传统体系银浆中高分子添加物结构力更大,分子间具有连续的长链结构,因而粘度较高,而当剪切速率较高时长链结构被外力破坏,粘度变差而易于造成流平,不利于细的栅线形成^[22]。从图 3(b)可以看出,通过改变毛细悬浮液银浆中有机载液配比,银浆 Ms-2 总体粘度得到增加。这是由于二次相液体的加入,在较大范围内调节毛细悬浮液银浆的流变性能,毛细管力得到增加,减缓了颗粒的沉降,提高了储存性能。

2.2 不同有机溶剂占比对毛细悬浮银浆流变的影响及丝网印刷结果

针对不同配比的毛细悬浮液体系银浆(A1—A4),进行粘度测试和丝网印刷,每组样品印刷3次,每次印刷2片,每片随机选取6条栅线,进行几何参数测量。银浆粘度对比结果如图4所示,印刷几何参数结果列于表3。

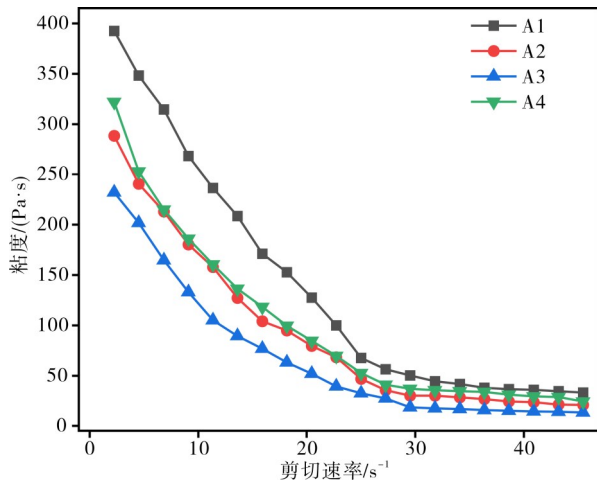


图4 不同有机溶剂占比毛细悬浮液体系银浆粘度对比
Figure 4 Comparison of viscosities of different proportions of pastes

表3 栅线的几何参数

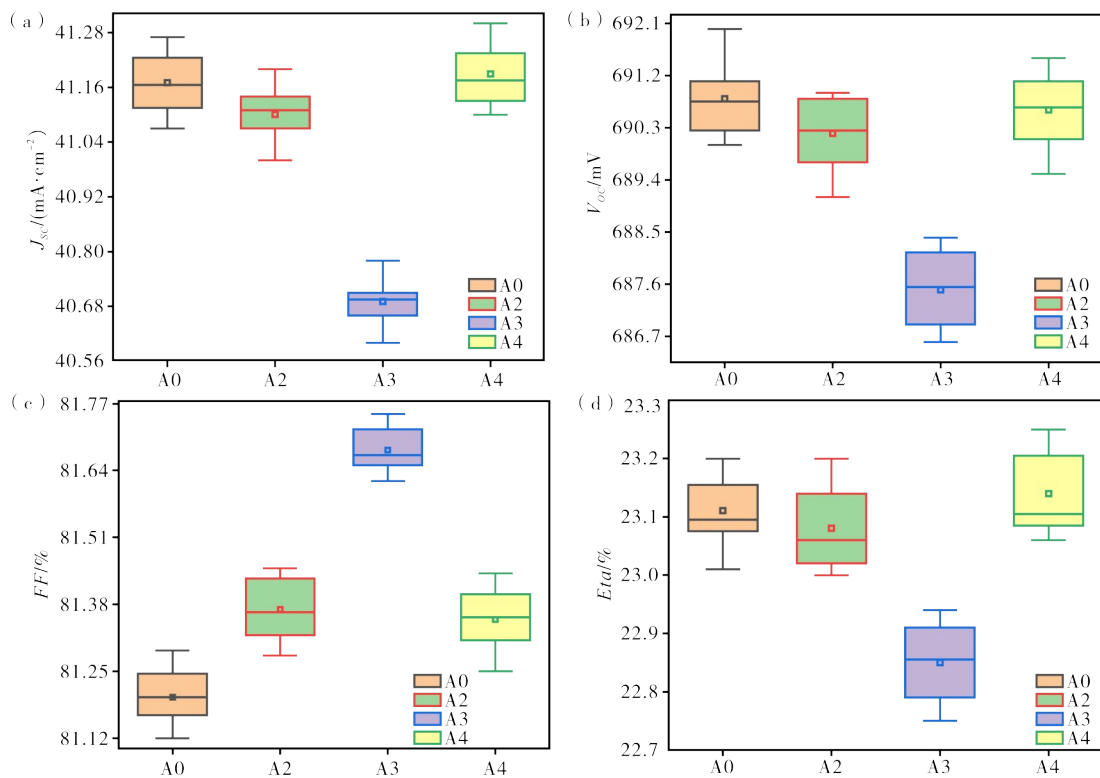
Table 3 Geometric parameters of grid lines

样品编号	平均宽度/ μm	平均宽度方差	平均高度/ μm	平均高度方差	高宽比
A0(传统银浆)	28.74	1.02	9.84	0.21	0.34
A1	24.20	0.88	6.10	0.09	0.25
A2	32.25	2.69	10.09	0.17	0.31
A3	46.52	5.43	9.63	0.83	0.21
A4	28.62	2.77	10.53	0.26	0.37

对4种不同配比的毛细悬浮液银浆样品,从固液比、主相液占比和二次相液占比进行讨论。A1样品中固相含量最高,表现为栅线宽度最小和高度最低,较高的固相含量使得银浆粘度较大,虽然其均匀性较好,但过大的粘度会造成网板堵塞和栅线断裂,导致印刷效果很差。A3样品中固相含量最低,表现为栅线宽度最大和高度较低,较低的固相含量使得银浆粘度较小,过网板后银浆的结构不能及时恢复易流平,使栅线的宽度进一步扩大,导致印刷效果较差。在太阳能电池正面,较大的栅线宽度会对电池造成遮光,影响电池的光电转换效率^[23]。A2样品和A4样品均表现出了较好的印刷性,虽然两者的二次相占比不同,但可以得到近似的印刷效果。其中,A4样品的印刷效果更好,其有更小的宽度和更高的高度,得到了最大的高宽比。A1和A4样品的粘度对比可以发现,含量适中的二次相液占比能得到更好的印刷效果,也证明了二次相液的微量变化可以较大的影响银浆的流变性。体系中溶液1和溶液2有近似的接触角度和表面张力,混合后有更好的相似相容性,形成的毛细悬浮液银浆有更强的毛细管力^[24]。溶液3则有较大的接触角度和较小表面张力,形成的毛细悬浮液银浆有较小的表面张力,更容易受外力破坏,使得银浆流动性更好^[22]。溶液3占比较大的A4样品流动性更好,印刷时虽然其结构遭到破坏,但印刷结束后结构又可以迅速恢复,保证了较好的栅线形貌,栅线的高宽比为0.37。A0为传统银浆体系样品,由于树脂等高分子添加剂的加入,印刷后虽然栅线宽度较窄,但高度较低,最终得到的高宽比仅为0.34。

2.3 电性能模拟及分析

针对印刷效果良好的样品进行电性能模拟。使用Griddler2.5模拟软件,选择P型PERC电池模型,电池尺寸为 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$,其总主栅数为3BB,总副(细)栅数为120条,针对栅线的几何形貌进行模拟,并与毛细悬浮液银浆体系进行电性能对比,模拟结果如图5所示。从图5可见,传统体系银浆A0样品具有更高的短路电流密度(J_{sc})和相对较大的开路电压(V_{oc})。这是由于较小的栅线宽度可减少太阳能电池正面的遮光损失,但会导致填充因子(FF)降低,最终影响电池的光电转换效率(η)。通过对比A2、A3、A4样品,进一步验证了栅线遮挡会降低太阳能电池的 J_{sc} 和 V_{oc} 。证明,较大的栅线高宽比可以增加电池的 J_{sc} 和 V_{oc} ,从而提高电池的光电转换效率 η 。



(a)—短路电流密度 J_{sc} ; (b)—开路电压 V_{oc} ; (c)—填充因子 FF ; (d)—转换效率 η 。
 (a)—short circuit current density J_{sc} ; (b)—open circuit voltage V_{oc} ; (c)—Fill factor FF ; (d)—conversion efficiency η 。

图5 电性能模拟结果

Figure 5 Electrical performance simulation results

3 结论

基于毛细悬浮液理论可制备出太阳能电池正面导电栅线用银浆,通过对粉体颗粒的形貌表征,固相粉末选择尺寸接近的微米级球形银粉和微米级玻璃粉。对银浆有机载体混溶情况进行探究,发现应减少聚合物添加剂的使用,选择可混溶的分散剂和触变剂作为双主相溶剂,选择与双主相溶剂不混溶的溶剂作为二次相溶剂,提高银浆的流变性能。对溶剂的挥发性也进行了热重测试,以确保银浆内溶剂分层次挥发,避免烘干、烧结时栅线结构的坍塌。同时,对毛细悬浮液银浆与传统银浆的流变-粘度进行了对比。结果表明,通过改变固相和二次相溶剂含量,可以在更大范围内调整银浆的粘度,进而使毛细悬浮液银浆匹配更多的印刷工艺。通过对不同配比的银浆粘度测试和丝网印刷测试,结果发现:固相含量较高时,印刷栅线的高度较低,甚至出现堵网、断栅现象;固相含量较低时,印刷栅线的高度较低但宽度较大,增加了太阳能电池表面的遮光面积。通过改变各组分分配比,最终得到平均高度 $10.53 \mu\text{m}$ 、平均宽度 $28.62 \mu\text{m}$ 、高宽比 0.37 的导电栅线,该导电栅线具有很好的连续性,无断栅现象发生。通过对印刷导电栅线进行电性能模拟发现,相比传统体系,

毛细悬浮液银浆可使样品的填充因子 FF 提升 0.15% 、转换效率 η 提升 0.03% 。本研究对太阳能电池的提效降本有一定的推动意义。

参考文献:

- [1] 袁森. 太阳能光伏技术的发展和前景[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(9): 278-281.
- [2] 余谟鑫, 戴子林, 陈少纯, 等. 太阳能电池封装技术[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(1): 1-4.
- [3] 王茹, 龚志明, 姜月, 等. 钙钛矿太阳能电池及其空穴传输研究综述[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(5): 703-717.
- [4] 李涛, 周春兰, 宋洋, 等. 晶体硅太阳能电池金属电极光学损失的理论分析与实验研究[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 795-800.
- [5] 谭浩巍, 谭富彬, 梁琦, 等. 晶体硅太阳能电池正面银浆的作用机制[J]. 贵金属, 2022, 43(1): 91-95.
- [6] 苟荣华. 基于价值工程的太阳能电池片正面银导电浆料优选研究[J]. 价值工程, 2023, 42(29): 130-133.
- [7] 郑建华, 张亚萍, 敖毅伟, 等. 银浆组成对硅太阳能电池丝网印刷欧姆接触的影响[J]. 太阳能学报, 2008, 29(10): 1274-1277.
- [8] 牛玉娇, 杨至灏, 黄少铭. 丝网印刷光伏电池正面电极银浆的流变学研究[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(3):

- 129-133.
- [9] 李旺,杨玉婧,周云凯.晶体硅太阳能电池的前电极结构设计及应用[J].河北科技师范学院学报,2021,35(3):52-58.
- [10] 李凯.太阳能电池前电极栅线优化理论与方法研究[D].广州:华南理工大学,2022.
- [11] 柳青,任明淑,刘子英,等.晶体硅太阳能电池正面银导电浆料的研究进展[J].信息记录材料,2012,13(2):39-46.
- [12] ERIN K, NORBERT W. Capillary forces in suspension rheology[J]. Science, 2011, 331(6019): 897-900.
- [13] ERIN K. Capillary suspensions: Particle networks formed through the capillary force[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2014, 19(6): 575-584.
- [14] ERIN K, WOLFGANG K, NORBERT W. Restructuring and aging in a capillary suspension[J]. Rheologica acta, 2014, 53(12): 947-957.
- [15] 莫丽玢,赵雷,周春兰,等.乙基纤维素和聚酰胺蜡在晶硅太阳能电池电极材料中的应用[J].稀有金属材料与工程,2019,48(3):994-1000.
- [16] ALLARD J, BURGERS S, GONZÁLEZ, et al. Effects of particle roughness on the rheology and structure of capillary suspensions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 648(5):129224.
- [17] KAZAMA R, MURAKAMI Y, SHONO A. Microstructure and rheological behavior of capillary suspension prepared with plate-shaped particles [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 637(20):128254.
- [18] 胡楠,刘芳,何力军,等.溶剂对银浆性能的影响[J].宁夏大学学报:自然科学版,2022,43(4):383-386.
- [19] 韩向超,张愿成,刘玉杰,等.有机载体对正面银浆印刷性能及电极形貌影响[J].电工材料,2017(3):11-14.
- [20] 孟晗琪,李艇,陈昆昆,等.添加剂对金属银粉形貌和粒径的影响[J].稀有金属材料与工程,2017,46(7):2007-2011.
- [21] 甘卫平,熊志军,罗林,等.有机载体对太阳能电池正面银浆料性能影响研究[J].化工新型材料,2014,42(8):141-144.
- [22] YÜCE C, OKAMOTO K, KARPOWICH L, et al. Non-volatile free silver paste formulation for front-side metallization of silicon solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 200 110040-110040.
- [23] 李晓东,孙希鹏,铁剑锐,等.一种减少太阳能电池细栅遮挡的光伏玻璃设计及其对太阳电池转换效率的影响分析[J].太阳能学报,2021,42(5):194-201.
- [24] SUR U K. Capillary force-induced tuning of suspension rheology [J]. Current Science, 2011, 100 (9) : 1283-1284.

Capillary Suspension Front Silver Paste Preparation and Screen Printing to Enhance Cost Efficiency of Crystalline Silicon Solar Cells

ZHAO Shikai, YANG Zhiqian, HONG Jiaqi, HU Kaixiang, LIU Xianzhe, CHEN Yizhan*
(School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: The decline in traditional energy utilization has spurred the rise of renewable green energy as a key driver in contemporary social development. Solar energy, a renewable and clean energy source, offers a number of advantages, including low cost, environmental friendliness, and broad applicability. Currently, the primary method of harnessing solar energy is through solar cells, significantly affecting their overall efficiency. This study explores the preparation and application of front-side silver paste using the theory of capillary suspension. Through material characterization, rheological analysis and screen printing, the formation of capillary suspensions and the effects of component ratios on the rheological properties and grid line morphology of the silver pastes were investigated. Screen printing of capillary suspension silver pastes resulted in printed grids with an average width of 28.62 μm , an average height of 10.53 μm , and an aspect ratio of 0.37. Compared to conventional methods, this approach reduces the utilization of additives, decreases residual impurities after sintering, lowers the line resistance of the electrode, and enhances the conversion efficiency of solar cells. Electrical property simulations of the obtained grid line morphology data revealed that the capillary suspension silver paste increased the fill factor (FF) by 0.15% and the photovoltaic conversion efficiency (η) by 0.03%. This study presents a novel approach to improving efficiency and reducing costs in the photovoltaic industry.

Keywords: renewable energy; green energy; solar cells; front-side silver paste; capillary suspension; rheology testing; screen-printing; efficiency and cost reduction

(学术编辑:孙文)