

银浆可提高硅太阳能电池的性价比

美国,宾夕法尼亚州,肯肖霍肯市,贺利氏工业技术材料有限公司: Weiming Zhang 博士

摘要:

银浆的质量和性能对硅太阳能电池的性价比有极大的影响,本文对这一议题进行了详细的阐述。

关键词:

银浆;Si 太阳能电池;接触电阻;线导电率;梳形指纵横比

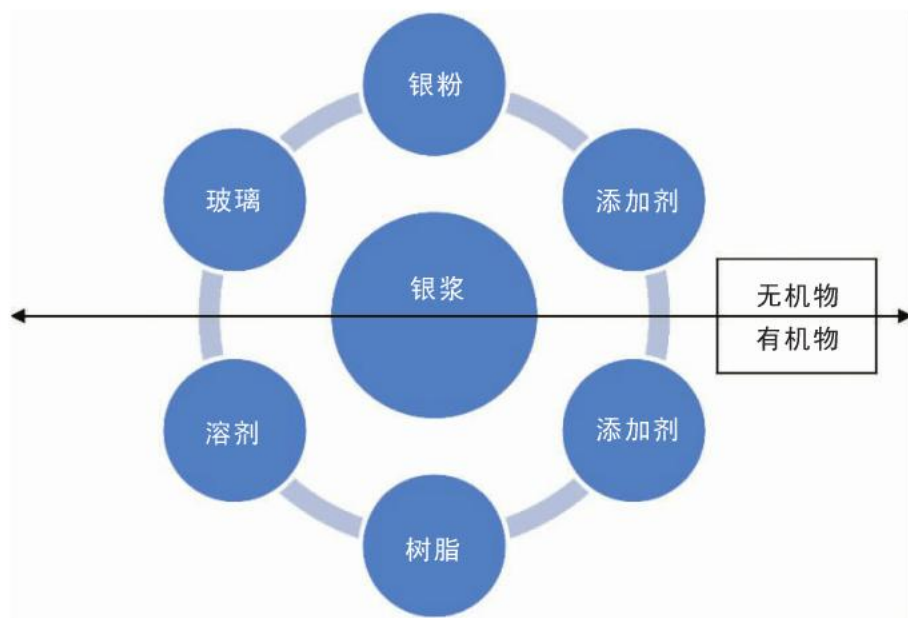


图 1 简化的银浆成分

引言

2009 年是光伏工业中一个极端的几乎空前的时期。在第一季度中,所谓的“太阳能的冬天”,这是由世界经济低迷尤其是西班牙市场暴跌引起的一个现象,几乎使太阳能制造业停止运转。但是该工业强烈地反弹,在同年的第三季度和第四季度在许多市场领域发生了爆发性增长。许多市场研究公司确认,2009 年硅太阳能电池的生产量高于 8 GW,与 2008 年相比增长 50% 以上。几乎所有的电池制造者全能力运转走过了 2009 年的下半年,这一趋势一直持续到现在。纵观 2010 年的光伏工业,总的来说是积极向上的,即使在德国政府于 2010 年 7 月开始削减上网电价补贴(FIT)让人有所担心的情况下。一些重要的太阳能电池生产者已宣布产能扩充计划。在这些公司中有一个不断增长的共识,光伏工业需

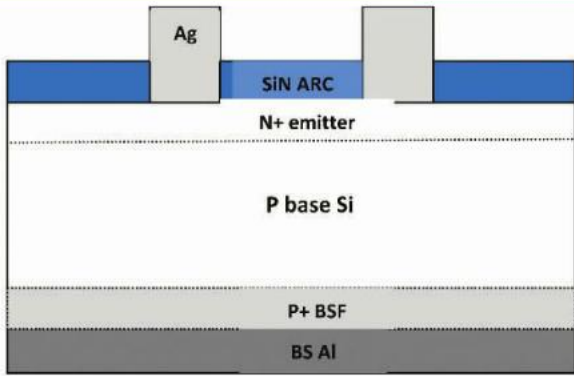
要从政府的激励计划中走出来,尽快在正常的公用事业市场上实现太阳能发电成本与传统能源发电成本相一致。在这一工业中,一些重量级的公司已展示出他们的路线图,在 2012 年和 2015 年间的某一时刻达到每瓦 1 美元的目标。为了实现这一目标,太阳能电池制造者、材料供应商和设备供应商将必须齐心协力并且空前合作。

银浆的质量和性能对太阳能电池的性价比有着极大的影响,本文将对这一议题进行详细的阐述。

银浆基础理论

用于硅太阳能电池的银浆与用于传统厚膜应用如混合电路的银浆有些类似。银浆的成分、制造工艺、甚至应用工艺如丝网印刷都非常相似。

什么是银(Ag)浆?浆料是一种由多种有机物和无机物均匀分散组



转换效率

$$\eta = J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF / P_{in}$$

少数载流子复合	接触质量
---------	------

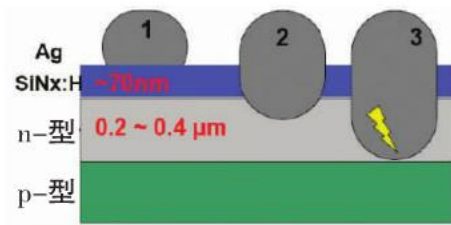
图 2 传统的硅太阳能电池结构示意图和效率公式

干燥/烧结阶段将被蒸发和耗尽,在晶片上留下无机化合物。浆料中的每一种成分都有其自己的功能。例如 Ag 粉起导电的作用,玻璃有助于穿透增透层,但是所有的功能元素是一个系统的组合,这使得浆料彼此之间存在着性能差异。高性能高质量的银浆应具有有良好的可印刷性、细线条和高纵横比、长丝网印刷寿命、良好可焊性、宽工艺窗以及良好的电气机械性能如效率

效率在实验室的单晶电池上已经实现,但是今天采用丝网印刷工艺生产的大多数单晶电池的效率约 18%,多晶电池约 16.3%。如图 2 所示,生产电池的结构看上去很简单。然而,来自材料和工艺方面的许多因素会极大地影响电池的效率。基底晶片的质量通常通过少数载流子寿命、钝化质量和背面反射场质量来量化,它对开路电压(Voc)有直接的影响。表面粗化质量、增透层质量和发射极质量对短路电流(Isc)有很大的影响。虽然 Voc 和 Isc 会受到少数载流子复合的影响,但是填充因子(FF)是浆料接触质量的直接指示器。用丝网印刷(SP)生产的电池与实验室中用光刻法(PL)制造的电池的损失机制比较如图 3 所示,最早发表于 2004 年^[1]。虽然 Si 太阳能电池生产技术、产品和工艺已有了很大的提高,尤其是丝网印刷和浆料,但是大多数的效率损失来源于金属化浆料接触质量、栅格遮蔽(反射比)和不良的短波长效应,这仍然是事实。金属化(SP 至 PL)对效率损失的直接影响大约为 1%;其它为 0.7%,而且或多或少地还受到金属化浆料的影响。很显然,金属化浆料的质量和性能对提高 Si 太阳能电池的效率起着非常重要的作用。

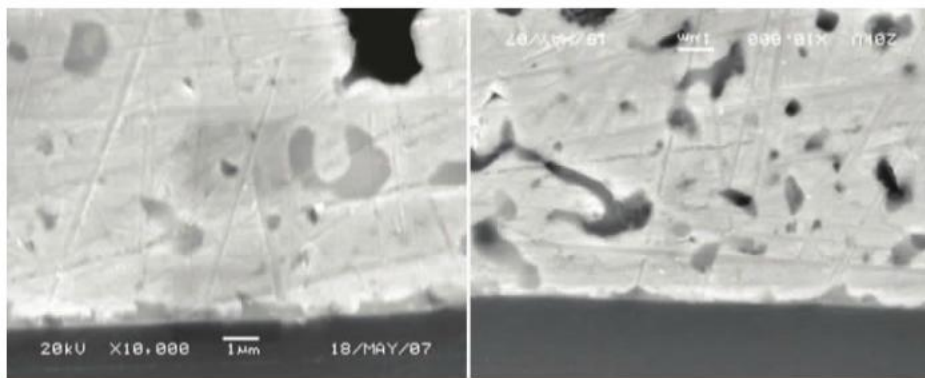


图 3 丝网印刷硅太阳能电池的损失因素



情况 1; 坏 $R_c \rightarrow$ 高 R_s
 情况 2; 好 $R_c \& R_{sh} \rightarrow$ 低 $R_s \&$ 高 R_{sh}
 情况 3; 坏 $R_{sh} \rightarrow$ 低 R_{sh}

图 4 形成良好接触,没有旁路



浆料 A

浆料 B

图 5 厚玻璃界面(左)和薄玻璃界面(右)

成的混合物,如图 1 所示。由于浆料需要通过丝网印刷或其它的沉积方法涂覆于晶片上,有机化合物的作用就是充当临时性的载体,它使得浆料具有粘性。这些有机化合物在

和高可靠性。

影响 Si 太阳能电池效率的因素

虽然 Si 太阳能电池的理论效率为接近 29%,而且高达 24.7%的

用于 Si 太阳能电池的银浆所面临的最大的挑战就是其独特的工艺与“尖峰烧结”。在几秒钟内达到 600 °C,银浆需要烧结穿过增透层(通常为 70 nm 厚的 SiNx:H 层),与硅形成尽可能低电阻的接触,无旁路 N/P 结,它仅在十分之几微米之下,如图 4 所示。在当今市场上,浆料的低接触电阻仍然是 N+ 接触的商业化银浆的最重要的因素之一。

在同样烧结温度曲线下,在同样的晶片上,烧结后的浆料 A(左)和浆料(B)如图 5 所示。Ag 导体和

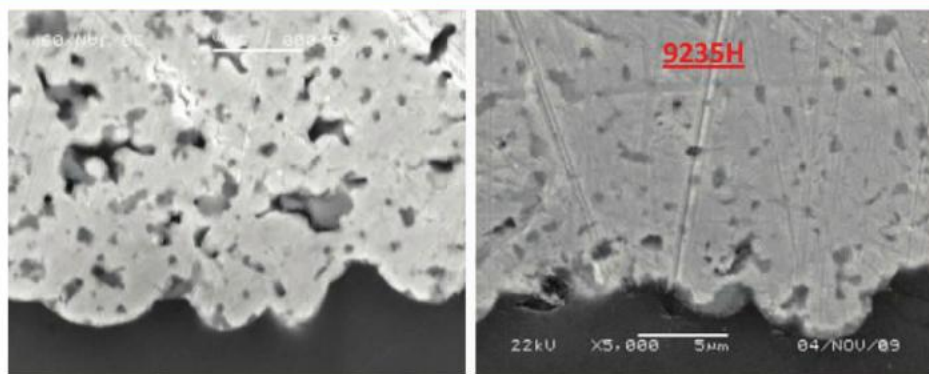


图 6 多孔的和致密的梳形线 SEM 剖面图

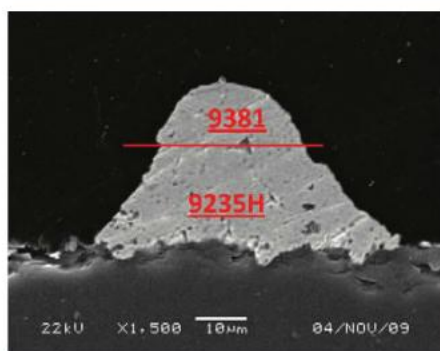


图 7 双印刷梳形线 SEM 剖面图

Si 晶片之间的界面中的不同是引人注目的，浆料 A 有厚的玻璃界面，而浆料 B 的大部分区域为薄的界面玻璃层。结果是浆料 A 具有几乎浆料 B 接触电阻的 2 倍。贺利氏的 SOL9235H 银浆，由于其独特的化学组成，具有业界最低的接触电阻。这将带来在宽范围的表面电阻发射极 ($50 \Omega/\text{sq} \sim 80 \Omega/\text{sq}$) 下电池的最高填充因子。

线导电率

尽管接触电阻是电池串联电阻 (R_s) 的关键部分，但是梳形线电阻是不能忽略的。在业界目前有几个趋势，如三母线设计、双印刷和第二步金属化，目标都是为了提高梳形线导电率。配方很好的银浆比其他银浆具有几乎高 50% 的导电率。图 6 的左图为烧结的 Ag 梳形横截面的相对多孔的微观结构，而右图的梳形物比较致密，为更好的导电率提供了基础。

双印刷技术是目前最热门的议题，因为随着印刷机对准精度提高

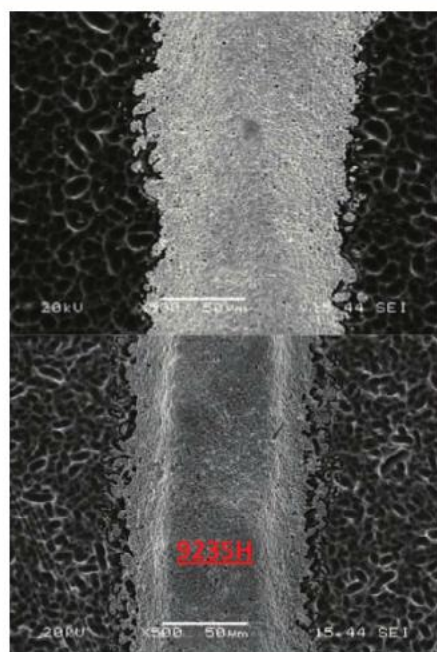


图 8 贺利氏 SOL 9235H 较高的纵横比

和金属化浆料的发展，它具有获得高效率的可能性（理论上高达 0.5%）。另一个好处是用于梳形线和母线的 de-link 浆料，它能够在母线上涂覆无蚀刻浆料，仅作为母线区域下将复合减到最少的一种手段。Voc 的几毫伏改进也已被证明^[2]。贺利氏正在提供一种专用浆料—CL80-9381，用于第二层和母线应用，有助于客户利用双印刷技术。采用 SOL9235H（第一层）和 CL80-9381（第二层）组合，可以实现 $60 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 的梳形线，并提高梳形线导电率 30%，如图 7 所示。

梳形物纵横比

由于双印刷的复杂性和对印刷

机及丝网的更高要求，光伏电池的制造者仍喜欢能实现高纵横比的单次印刷。能够实现较高纵横比的梳形线是不同于当今市场上商业化银浆的另一个因素。贺利氏银浆 SOL9235H (图 8a) 与非贺利氏银浆 (图 8b) 的梳形线比较如图 8 所示。其形态显然不同，SOL9235H 产生比较窄而且也比较高的梳形线。SOL9235H 的另一个关键好处是它带来较高的电池电流密度，因为减少了来自梳形物的遮蔽，同时具有较低的串联电阻。

由于丝网印刷自身不一定提供高纵横比；丝网印刷的浆料传送和最终印刷质量对电池的影响是很大的，然而，不幸的是，在业界往往被忽略了。具有不良曝光质量的丝网（过度曝光或曝光不足）往往具有粗糙的开孔边缘或“堵塞”，如图 9 所示。由于丝网堵塞看到电池上的碎裂将是毫不奇怪的。



图 9 在开孔上有“堵塞”的新丝网

粘附强度

硅太阳能电池上银浆的粘附正受到光伏界越来越多的关注，因为模组制造者对他们的模组提供 25 年的担保。能够提供良好的担保，在很大程度上取决于制造模组所使用的材料，浆料粘附在模组中是延伸电池寿命的一个重要因素。尽管没有粘附测试的业界标准，但是拉力强度和失效模式通常是银浆的两个微分器。焊接方法 (IR、热风或其他) 和热温度曲线、焊带类型和焊剂类型所有这一切都对浆料的可焊性和

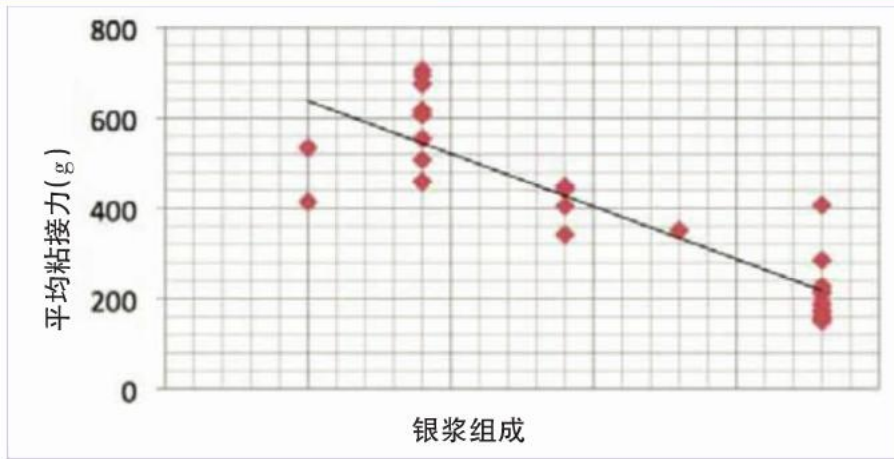


图 10 浆料组成与浆料粘接力关系

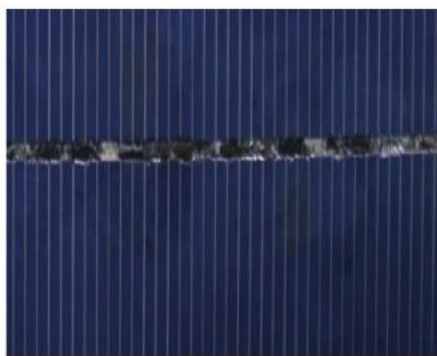


图 11 Ag/Si 界面粘附失效



图 12 Ag/Si 界面粘着失效

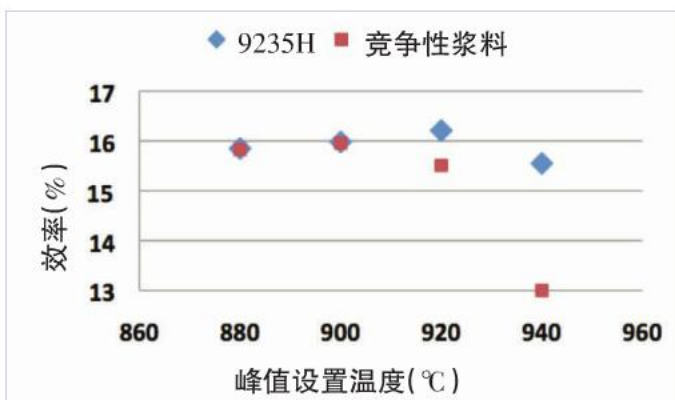


图 13 SOL 9235H 更宽的工艺窗

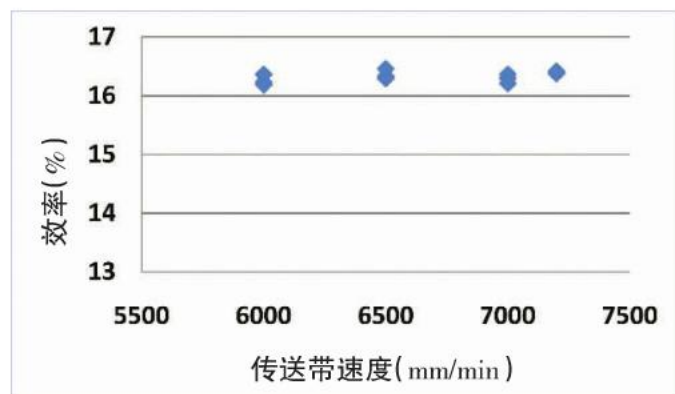


图 14 采用 SOL 9235H, 传送带速度对电池效率的影响

的内部,如图 12 所示,这是光伏业界所希望看到的。贺利氏的专有设计使粘着失效模式银浆 SOL9235H 具有高的粘附强度,有助于用户满足高可靠性要求。

烧结工艺窗

较宽的工艺窗是电池制造者所期望的另一个重要性能。因为烧结期间晶片的实际温度将受到晶片厚度、AR 涂层均匀性、发射极一致性以及炉温波动的影响,每一个晶片将会在温度上有相当大的变化。这是今天的生产线仍然能看到的效率明显波动的原因之一。能够使银浆保持良好的接触,在很宽的烧结温度范围内没有旁路,这是另一个关键因素。SOL9235H 在实际的多条用户生产线上已被证明,在比竞争性浆料较宽的温度工艺窗内,保持高效率,如图 13 所示。来自现场支持的反馈信息,有关我们研究的烧结炉传送带速度(和烧结温度曲线)对电池效率的影响的结果如图 14 所示。在这一研究中,炉温的设置对所有的试样都是一样的,仅改变传送带速度,从 6 000 mm/min 至 7 200 mm/min。这一测试证明了 SOL9235H 在不同的烧结温度曲线下的性能鲁棒性。

银浆为效率提高带来好处

在硅光伏业界,电池效率的提高约为每年 0.5%。主要来源于金属化浆料方面,尤其是正面银浆,这已被公众所认可。在 2009 年的第 4 季度,贺利氏在硅光伏市场上推出了其旗舰银浆产品 SOL9235H。在生产线上采用贺利氏浆料的用户均获得了显著的经济效益。我们的用户,在多晶硅和单晶硅电池上采用 SOL9235H 均比其它银浆获得了 0.2%~0.4% 的效率提高,如图 15 所示。假定 1 美元/W 的电池售卖价格,那么这将转化(下转第 16 页)

粘附产生影响。从银浆配方的角度看,我们发现浆料的组成和粘附之间有很强的关联关系,如图 10 所示。拉力测试后 Ag/Si 界面的失效模式仍然有一个争议区^[3]。通常来说,工程师想要避开粘附测试后这个“坑形”缺陷(大块的硅被拉掉了),如图 11 所示,由于该问题涉及到烧结和焊接后母线下可能的微裂纹。所谓的粘着失效模式,即失效发生在 Ag 浆

MI 将关注再生能源领域中通过电子工业技术能最好地解决问题的领域(如辅助技术领域),加强与替代能源领域的合作。

根据我们以往的经验,我们发现开展这样的工作最有效的方法是组织一个专题讨论会,把许多的工业引领者们集中起来,共同探讨面临的挑战,优先发展可能的协作,开始业界领先的初步计划,弥合已确定的差距。

为此目的,iNEMI 将主办一个为期两天的专题讨论会,由 Cisco 承办,地点就在他们的圣何塞工业园区,时间为 10 月 20 日—21 日。

讨论会内容如下:

* 引领者将来自许多的绿色能源技术领域,包括风能、太阳能(PV、CPV、CSP 等)、智能电网、能源存储(电池、燃料电池等)和电力调节或电力管理(逆变器、合路器等)。

* 确定技术差距——主要是在“辅助技术”领域,我们相信整合协同的电子工业将创造最大价值。

* 标准化调查包括组装、测试、可靠性评价和共性的类似领域。

* 集体研讨技术差距、选项和优先权。

* 基于会议的结果,建立行动小组,处理具体问题。

我们相信这项工作将把再生能源解决方案的开展向前推动一大步。我们诚邀电子制造公司以及替代能源公司参与这项工作,为这项工作重要的工作设定议程。欲了解这一工作的更多细节请登录下列网址:

http://www.inemi.org/cms/calendar/Energy_ws_Oct_2010.html

作者简介

Jim McElroy(jmcelroy@inemi.org)曾是 iNEMI 的首席执行官,现在为联盟顾问。

Robert(Bob) Pfahl (bob.pfahl@inemi.org)是 iNEMI 全球运营副总裁。



图 15 采用 SOL9235H 获得的电池性能

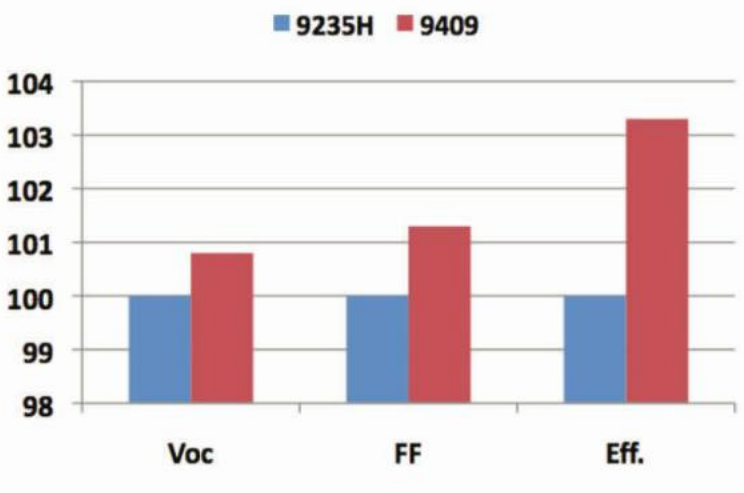


图 16 100 Ω/sq 发射极上新一代银浆 SOL94xx 性能

(上接第 13 页)

为每一电池 6%~12% 的成本节约。

作者简介

Zhang Weiming 博士是贺利氏工业技术材料有限公司光伏事业部的副总裁。Zhang 毕业于密苏里大学罗拉分校并获得陶瓷工程博士学位,他在贺利氏公司任职期间从事了应用于不同元件的 LTCC 粉末、带和端电极浆料等产品的开发,并得到了公众的认可。

参考文献

[1] M.M. Hilali, A. Rohatgi and B. To; “A review and understanding of screen-printed contacts and selective emitter formation”; Proc. Of the 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules (2004).

[2] T. Pham and W. Zhang, “Improving electrical performance by double print method and non contact busbar design”; submit to 25th EU PVSEC (2010).

[3] J. Moyer and W. Zhang, “The role of silver contact paste on reliable connectivity systems”; submit to 25th EU PVSEC (2010).