

银纳米线的可控合成及其应用

叶雄峰^{1,2}, 刘媛¹, 李晗¹, 杨虎¹, 袁小磊¹, 朱鹏^{1*}

¹南通大学化学化工学院, 江苏 南通

²中国科学技术大学纳米科学技术学院, 江苏 苏州

收稿日期: 2023年8月21日; 录用日期: 2023年10月31日; 发布日期: 2023年11月7日

摘要

硅异质结(HIT)太阳能电池有着优异的光电转化效率和巨大的发展前景,然而其所用的低温固化浆料相比高温烧结浆料导电性较差。本文通过多元醇法制备银纳米线,探究了硝酸银(AgNO₃)、三氯化铁(FeCl₃)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)对银纳米线形貌的影响。我们成功地制备得到长度为8 μm,直径为100 nm,且适用于丝网印刷的银纳米线,并将其应用于低温固化银浆。结果表明在0.07 M硝酸银、0.108 M PVP和600 mM FeCl₃的条件下,得到的银纳米线产率和形貌最佳。在添加适量的银纳米线的情况下,低温固化电极的线电阻明显降低。添加0.24 wt%的银纳米线,得到的栅线线电阻最低,为1.43 Ω/cm。

关键词

硅异质结太阳能电池, 低温固化银浆, 银纳米线

Controllable Synthesis of Silver Nanowires and Its Applications

Xiongfeng Ye^{1,2}, Yuan Liu¹, Han Li¹, Hu Yang¹, Xiaolei Yuan¹, Peng Zhu^{1*}

¹School of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

²Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou Jiangsu

Received: Aug. 21st, 2023; accepted: Oct. 31st, 2023; published: Nov. 7th, 2023

Abstract

Silicon heterojunction (HIT) solar cells have excellent photoelectric conversion efficiency and huge development prospects, while the low-temperature curing slurry has poor conductivity compared to high-temperature sintering slurry. In this paper, silver nanowires were prepared by polyol method, and the effects of AgNO₃, ferric chloride (FeCl₃), and Polyvinylpyrrolidone (PVP) on the mor-

*通讯作者。

phology of silver nanowires were systematically investigated. We have successfully obtained a length of 8 μm silver nanowires with a diameter of 100 nm, which is suitable for screen printing and low-temperature curing silver paste. The results show that the yield and morphology of silver nanowires are the best by using 0.07 M AgNO_3 , 0.108 M PVP and 600 mM FeCl_3 . When an appropriate amount of silver nanowires is added, the line resistance of low-temperature cured electrode is significantly reduced. Importantly, 0.24 wt% silver nanowires could result in the lowest gate line resistance of 1.43 Ω/cm .

Keywords

Silicon Heterojunction Solar Cells, Low-Temperature Solidified Silver Paste, Silver Nanowires

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来硅异质结(HIT)太阳能电池由于其优异的光电转化效率,广阔的市场前景引起了越来越广泛的关注。松下公司成功将 HIT 太阳能电池的光电转换效率提升至 24.7% [1],在背接触结构中实现了更高的 25.6%的转化效率[2]。HIT 太阳能电池的高转换效率归功于本征 a-Si:H 薄膜对 c-Si 表面优异的钝化[3] [4],但温度超过 400 $^{\circ}\text{C}$ 时,本征 a-Si:H 薄膜会显著析氢,影响电池的光电转化效率[5] [6]。为了防止热处理对太阳能电池组件的破坏,采用低温固化银浆进行丝网印刷来制造 HIT 太阳能电池的金属电极。与传统的高温烧结浆料相比,低温固化浆料印刷的电极电阻较高[7]。为了实现 HIT 太阳能电池的高转换效率和开发其巨大的发展潜力,降低低温固化电极线电阻至关重要。

银颗粒是导电银浆的主要填料,已报道的银颗粒有许多不同形状,如纳米球形颗粒、纳米线、纳米棒、枝晶、纳米和微米薄片、纳米立方体等[8] [9] [10] [11] [12]。其中,银纳米线因其优良的光学和电性能而在太阳能电池[13] [14]、微电子器件[15] [16]领域有着重要的应用。银纳米线的合成有多种方法,包括模板法[17] [18] [19]、溶剂热法[20]、紫外光照射法[21]、多元醇法[22] [23]等,其中多元醇法因其绿色环保、易于大批量生产而被广泛接受。该方法使用多元醇既充当还原剂也充当溶剂,使用 PVP 作为表面活性剂,在加热条件下通过调控各关键因素控制银纳米晶体的形貌。Xia 等人[24]将三氯化铁(FeCl_3)作为蚀刻剂应用于银纳米线的合成。在银纳米线的合成过程中添加 Fe^{3+} 后,多元醇的还原速率加快。此外, Fe^{3+} 的存在可以去除银纳米颗粒表面的氧原子,从而保护银纳米颗粒免受氧化蚀刻。他们得出的结论是,含铁盐可以有效促进银纳米线的生长。Xia 等人[25]发现添加 CuCl 或 CuCl_2 能促进银纳米线的生长,他们指出银纳米线的生长需要 Cu^+ 离子和氯离子的协同作用。 Cu^+ 离子用于去除银种子表面的氧原子以防止氧原子阻挡银纳米结构的生长,并防止银纳米结构被氧化蚀刻。同时,氯离子可以通过静电相互作用稳定银种子,并且氯阴离子还通过形成难溶的 AgCl 来降低过高浓度的游离 Ag^+ 离子浓度。在氯化钠存在的条件下,同样可以制备优良的银纳米线[26]。氯化钠加速了纳米立方体的形成,纳米立方体充当随后形成纳米线的种子。而 Wei [27]等人选择先制备 AgCl 悬浮液,再系统调控 AgCl 悬浮液的用量,成功合成了长径比超过 1500 的银纳米线。可见在没有额外金属离子的作用下,氯离子仍然对银纳米线种子的生成及后续生长发挥了重要作用。而同为卤素离子的 Br^- 离子也能够调控银纳米线的生长,Zhai [28]等人发现 Br^- 离子能有效减小银纳米线的直径并使其变长,通过调控 Cl^- 和 Br^- 的浓度,制备了长径比约 2600 的银纳米线。除了卤素离子和金属离子的影响,PVP 也是影响银纳米线产率和长径比的重要因素。Ye 等人[29]

使用不同分子量的 PVP 分子的混合物合成高纵横比的银纳米线。PVP 分子作为封端剂对控制初始银种子大小和后期生长阶段有着重要作用。

在本文中,我们采用多元醇法,使用乙二醇作为还原剂和溶剂,在 110°C 以上加热的条件下,乙二醇(EG)转化为乙醇醛(GA) [30]还原硝酸银(AgNO_3),并使用 FeCl_3 和 PVP 诱导和控制银纳米线的生长。我们通过调节 AgNO_3 、 FeCl_3 和 PVP 的浓度用以控制银纳米线的长度、直径、形貌,并成功制备了适合丝网印刷的银纳米线。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

扫描电子显微镜(TESCANVEGA3-LMH);硝酸银(AgNO_3 , 99.8%, 中船重工黄冈贵金属有限公司),乙二醇(EG, 上海阿拉丁试剂有限公司),聚乙烯吡咯烷酮(PVP, 上海阿拉丁试剂有限公司, $M_w = 360,000$),六水合三氯化铁($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 上海麦克林生化科技有限公司),丙酮(国药集团化学试剂有限公司),无水乙醇(国药集团化学试剂有限公司)。所有购买的试剂药品均直接使用,无需进一步纯化。

2.2. 银纳米线的合成

首先,将一定量的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)溶于 22 mL 乙二醇(EG)溶液中,然后将一定量的硝酸银(AgNO_3)溶于 3 mL EG。其次,将 22 mL PVP 溶液加入圆底烧瓶预热至 150°C,并且将包含 3 mL AgNO_3 溶液和 3 mL 三氯化铁溶液(6×10^{-4} M, 在 EG 中)的混合溶液快速加入到圆底烧瓶中,将反应溶液保持在 150°C,磁力搅拌 1.5 小时确保反应完成。最后,将得到的产物用离心机 4000 rpm 洗涤 3 次,其中清洗溶液为丙酮和乙醇混合溶液。采用真空干燥箱烘干离心洗涤后的样品,待烘干后采用扫描电子显微镜(SEM)等仪器对样品形貌进行表征。

2.3. 电子浆料的制备

将 30 wt% 片状银粉、60 wt% 球形银粉、0~0.48 wt% 的银纳米线和有机载体混合。通过分散机分散后,使用三辊研磨机对银浆进行研磨后得到导电银浆。将浆料通过丝网印刷至硅片上,测量栅线的线电阻与接触电阻。

3. 结果与讨论

如图 1 所示,我们获得了长度为 8 μm ,直径为 100 nm 的银纳米线,产率为 85.8%。我们发现银纳米线的形貌、产率和 PVP 浓度、 AgNO_3 浓度、 FeCl_3 浓度、反应温度有着密切的关系。

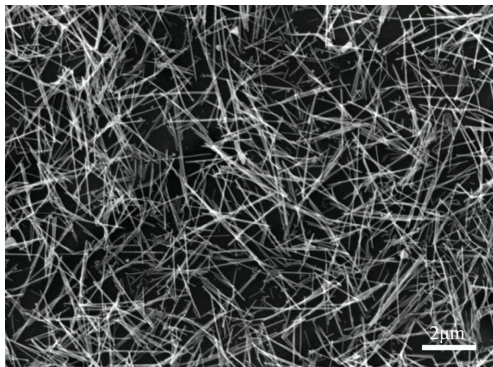


Figure 1. SEM image of silver nanowires
图 1. 银纳米线的 SEM 图像

3.1. PVP 浓度的影响

在本文中, 我们通过调整 PVP 浓度可以实现银纳米结构的调控, 相应的结构包括银纳米棒、银纳米线和纳米颗粒。图 2 显示了不同 PVP 浓度下所合成样品的 SEM 图像。当 PVP 浓度为 0.036 M 时, SEM 图像显示了银纳米棒、部分不规则的棒状产物和银纳米颗粒掺杂的混合结构(图 2(a))。当 PVP 浓度提升到 0.072 M 时, SEM 图像显示出纳米线结构, 但同时含有银纳米棒及纳米颗粒结构(图 2(b))。随着 PVP 浓度提升至 0.09 M 时, 产物出现了较多的银纳米线, 并伴随着一些棒状结构和纳米颗粒(图 2(c))。在 0.108 M 的 PVP 浓度下, 银纳米线是主要产物(图 2(d))。如图 2(e)、图 2(f)所示, 当 PVP 继续升高 0.126 M 与 0.144 M 时, 银纳米线的产率明显地下降。基于以上分析, 作为表面活性剂, PVP 浓度对纳米银的线性生长与产率起着重要作用。这是由于 PVP 中的氮和氧原子使其可以吸附在银晶种或银颗粒的表面, 而且 PVP 对(100)晶面的吸附作用比对(111)晶面的作用更强。银的(100)晶面被 PVP 包覆, 使得银原子难以从该晶面生长。因此, 银的(111)晶面是纳米晶体唯一的成核面。当 PVP 浓度较低时, 由于量少其不足以包覆银的(100)晶面, 因而使得制备的银纳米线形貌不均匀, 并产生大量副产物。当 PVP 浓度较大时, 银的(111)晶面被 PVP 包覆, 银生长的选择性降低, 因而出现副产物。

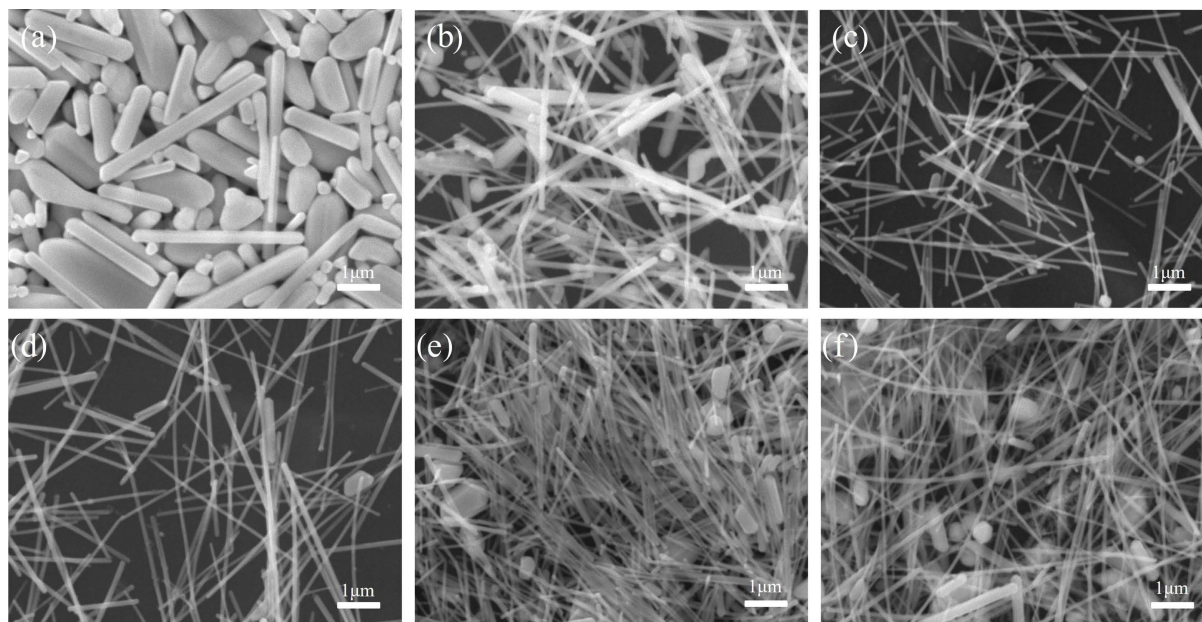


Figure 2. SEM images of silver nanowires under different PVP concentrations: (a) 0.036 M; (b) 0.072 M; (c) 0.09 M; (d) 0.108 M; (e) 0.126 M; (f) 0.144 M

图 2. 不同 PVP 浓度下的银纳米线 SEM 图像: (a) 0.036 M; (b) 0.072 M; (c) 0.09 M; (d) 0.108 M; (e) 0.126 M; (f) 0.144 M

3.2. FeCl_3 浓度的影响

图 3 显示了不同 FeCl_3 浓度下合成的样品的 SEM 图像。如图 3(a)、图 3(b)所示, 当 FeCl_3 浓度较低时, 合成的产物中存在直径为 50 nm 的银纳米线, 同时还混有直径为 300 nm 到 700 nm 的银纳米棒。该混合结构形成的原因在于氯离子与 AgNO_3 反应生成氯化银(AgCl)纳米立方体, 为银离子提供了可以进行还原的位点。因此, 银纳米颗粒可以聚集在 AgCl 纳米颗粒的表面上, 其中一些银纳米颗粒形成多重孪晶颗粒, 随后在 PVP 的辅助下生长为银纳米线。当 FeCl_3 浓度过低时, 只有部分银离子在 AgCl 纳米颗粒表面成核, 生长为长径比较高的银纳米线, 其余银离子在被还原后自成核, 生长为长径比较低的银纳米棒。

随着反应的进行, AgCl 纳米立方体最终被还原, 释放出附着的银纳米线。当 FeCl_3 浓度提高到 600 mM (图 3(c)) 时, 银纳米线的产率显著提高。随后将 FeCl_3 浓度升高到 700 mM (图 3(d)), SEM 图像显示出直径为 50 nm 的银纳米线和直径为 200 nm 到 300 nm 的银纳米棒的混合产物。当 FeCl_3 浓度进一步升高到 1.2 μM (图 3(e)) 时, 银纳米颗粒显著增多, 并且还存在未被还原的 AgCl 纳米立方体。当 FeCl_3 浓度升高到 1.8 μM (图 3(f)) 时, 产物是直径为 300 nm 的银纳米棒和银纳米颗粒, 其中没有观测到银纳米线。这是由于过量的氯离子会导致银离子浓度降低, 使银李晶后续的生长缺乏足够的银离子, 并且过量的 Fe^{3+} 会刻蚀银纳米线, 因此银纳米颗粒随着 FeCl_3 浓度的升高而增加。

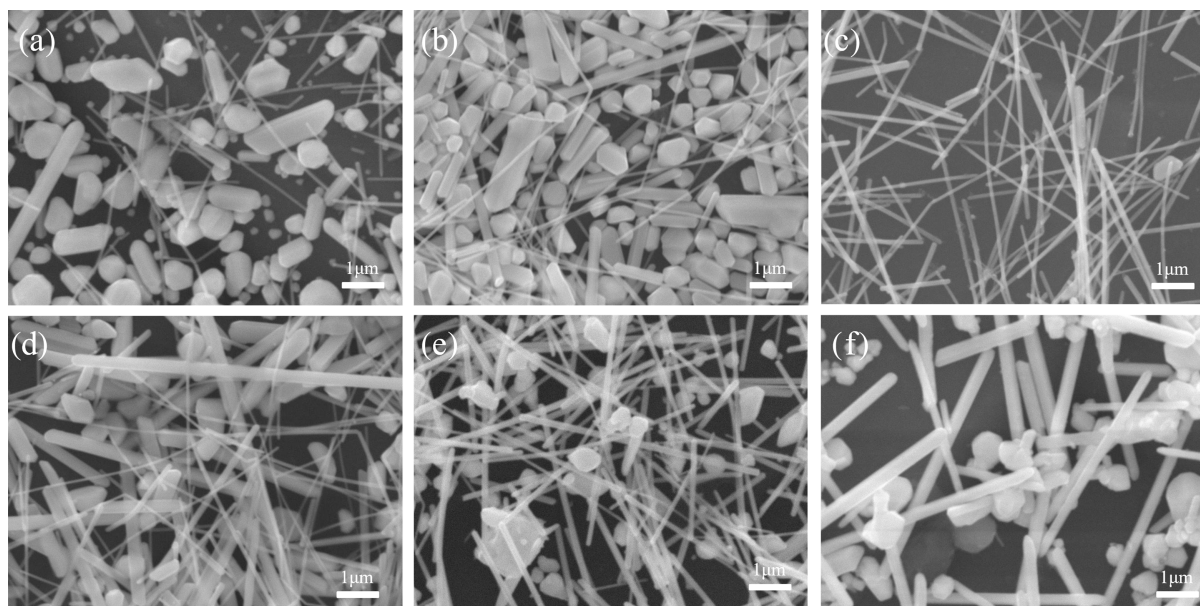


Figure 3. SEM images of silver nanowires at different FeCl_3 concentrations: (a) 0.3 μM ; (b) 0.5 μM ; (c) 0.6 μM ; (d) 0.7 μM ; (e) 1.2 μM ; (f) 1.8 μM

图 3. 不同 FeCl_3 浓度下的银纳米线 SEM 图像: (a) 0.3 μM ; (b) 0.5 μM ; (c) 0.6 μM ; (d) 0.7 μM ; (e) 1.2 μM ; (f) 1.8 μM

3.3. AgNO_3 浓度的影响

图 4 显示了不同 AgNO_3 浓度下合成的样品的 SEM 图像。如图 4(a) 所示, 当 AgNO_3 的浓度为 0.047 M 时, 产物是直径为 200 nm~300 nm 的银纳米棒和少量的银纳米颗粒, 并且纳米棒形状规整, 长度分布范围较大。将 AgNO_3 的浓度提升到 0.059 M (图 4(b)) 和 0.065 M (图 4(c)) 时, 得到银纳米线直径为 60 nm, 并且银纳米棒和银纳米颗粒的比例显著降低。如图 4(d) 所示, 在硝酸银的浓度为 0.07 M 时, 我们得到了产率较高的银纳米线, 其直径为 100 nm, 长度为 8 μm ~10 μm 。当 AgNO_3 的浓度升高至 0.076 M 时(图 4(e)), 银纳米线的产率显著下降。在此条件下, 银纳米棒显著增多和银纳米颗粒显著减少, 而且相应的纳米棒的直径变大, 其直径可达 500 nm。当 AgNO_3 的浓度继续升高至 0.082 M 时(图 4(f)), 银纳米短棒产率大幅增加, 银颗粒的产率也相应的增多。基于以上数据分析, 我们推测在使用较低浓度的 AgNO_3 条件下, Ag^+ 还原过程较为缓慢, 与此同时 PVP 与 AgNO_3 的摩尔比较高, 进而有效地抑制了纳米线两端的生长。因此, 在此条件下容易得到 200 nm~300 nm 的银纳米棒和部分少量的银纳米颗粒。当 AgNO_3 浓度提高后, 由于 PVP 抑制作用降低, 因而通过调控适当的 PVP 与 AgNO_3 摩尔比(PVP 与 AgNO_3 的摩尔比为 1.5), 可以得到较高产率的纳米线。当进一步增加 AgNO_3 的浓度, 银纳米线的产率会显著的下降。首先, 这是由于 PVP 与 AgNO_3 摩尔比的较低时, PVP 对银纳米线形貌控作用显著地减弱; 其次, 在使用高浓度 AgNO_3 的情况下, Ag^+ 还原过程会显著地加快, 导致银纳米晶体自成核并形成纳米颗粒。

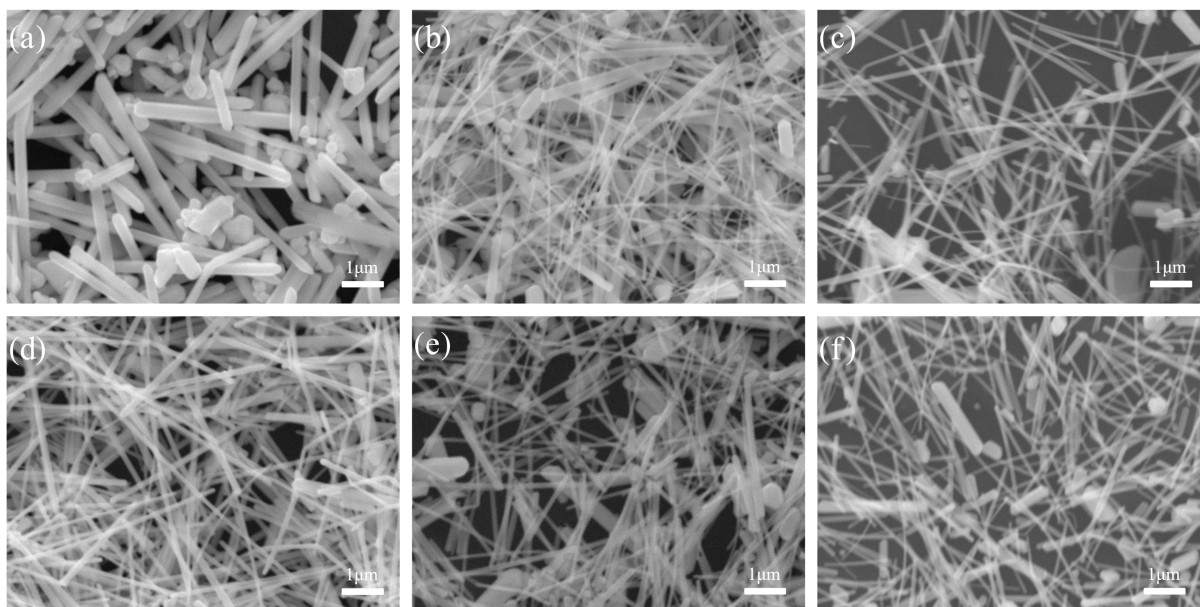


Figure 4. SEM images of silver nanowires at different AgNO_3 concentrations: (a) 0.047 M; (b) 0.059 M; (c) 0.065 M; (d) 0.07 M; (e) 0.076 M; (f) 0.082 M

图 4. 不同 AgNO_3 浓度下的银纳米线 SEM 图像: (a) 0.047 M; (b) 0.059 M; (c) 0.065 M; (d) 0.07 M; (e) 0.076 M; (f) 0.082 M

3.4. 银纳米线添加量对栅线电性能的影响

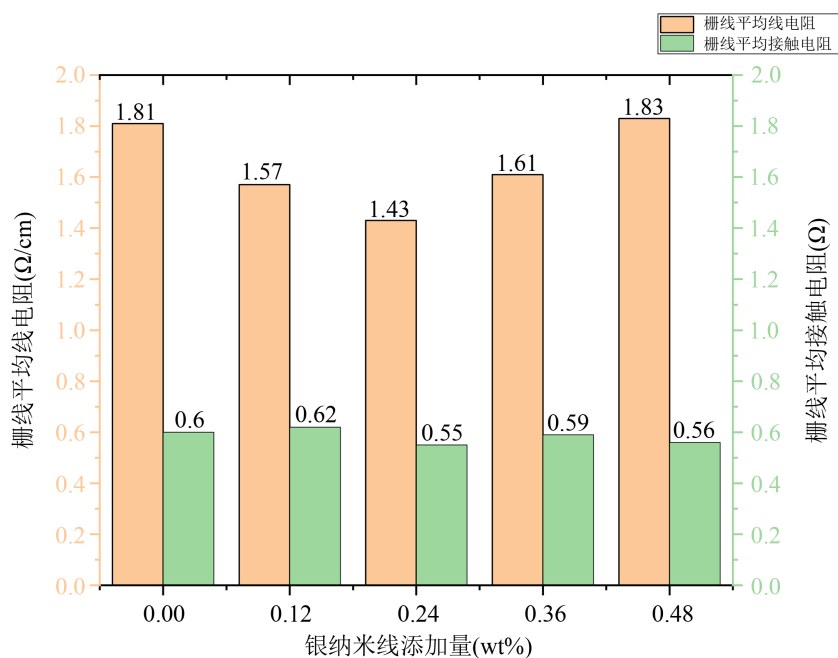


Figure 5. Average line resistance and average contact resistance of gate lines under different silver nanowire contents

图 5. 不同银纳米线含量下栅线的平均线电阻与平均接触电阻

在本工作中, 通过调控银纳米线的添加量, 并将其与有机载体等混合配置成导电银浆, 然后将导电银浆印刷到硅片上, 通过测试栅线的平均线电阻和平均接触电阻来优化银纳米线的结构与制备工艺。如

图 5 所示, 添加 0%~0.48% 的银纳米线后, 栅线的平均接触电阻没有明显的变化。有趣的是栅线的平均线电阻随着银纳米线含量的增加呈现出先降低后升高的趋势。在添加 0.24% 的银纳米线时, 栅线的线电阻降到最低, 其线电阻为 1.43 Ω/cm 。在栅线中, 以片状银粉和球形银粉为主, 片状银粉之间为面接触, 球形银粉之间以及其和片状银粉之间为点接触。然而片状银粉在印刷时无法整齐地排列, 他们之间往往存在着空隙, 通过添加小粒径的球形银粉, 填充到这些空隙中, 能够有效地增多其接触位点。相比之下, 银纳米线与片状银粉的线接触与球形银粉的点接触相比有着更大的接触面积。我们在添加适量的银纳米线后, 栅线的线电阻明显降低。尽管如此, 银纳米线不易展开, 在添加过量的银纳米线后, 由于银纳米线的团聚, 银粉间的接触面积反而降低, 所以在添加量超过 0.24% 后, 部分银纳米线阻碍了球形银粉和片状银粉的接触, 使得栅线的线电阻明显升高。

4. 结论

本文采用多元醇法系统地探究银纳米线、纳米棒以及纳米颗粒的结构调控及其导电浆料阻抗的优劣。通过调控硝酸银(AgNO_3)、三氯化铁(FeCl_3)以及聚乙烯吡咯烷酮(PVP)的浓度, 成功地探究出制备银纳米线的最佳合成工艺。当硝酸银浓度为 0.108 M, PVP 浓度为 0.07 M, FeCl_3 浓度为 600 mM 时, 能够制备得到高产率的银纳米线, 其长度为 8 μm , 直径为 100 nm。更重要的是, 该尺寸有利于丝网印刷。因此, 我们将其添加至低温固化银浆, 通过丝网印刷后测量栅线的线电阻和接触电阻, 发现添加适量的银纳米线可以有效降低栅线的线电阻, 而且当银纳米添加量为 0.24 wt% 时, 线电阻达到最低, 阻值为 1.43 Ω/cm 。

参考文献

- [1] Taguchi, M., Yano, A., Tohoda, S., *et al.* (2013) 24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **4**, 96-99. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282737>
- [2] Masuko, K., Shigematsu, M., Hashiguchi, T., *et al.* (2014) Achievement of More than 25% Conversion Efficiency with Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **4**, 1433-1435. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2352151>
- [3] Pankove, J.I. and Tarng, M.L. (1979) Amorphous Silicon as a Passivant for Crystalline Silicon. *Applied Physics Letters*, **34**, 156-157. <https://doi.org/10.1063/1.90711>
- [4] Wei, C.Y., Lin, C.H., Hsiao, H.T., *et al.* (2013) Efficiency Improvement of HIT Solar Cells on p-Type Si Wafers. *Materials*, **6**, 5440-5446. <https://doi.org/10.3390/ma6115440>
- [5] Mikolášek, M., Nemeč, M., Kováč, J., *et al.* (2014) The Influence of Post-Deposition Annealing upon Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells. *Materials Science and Engineering: B*, **189**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2014.07.003>
- [6] De Wolf, S. and Kondo, M. (2009) Nature of Doped α -Si: H/c-Si Interface Recombination. *Journal of Applied Physics*, **105**, Article ID: 103707. <https://doi.org/10.1063/1.3129578>
- [7] Zhang, R., Moon, K.S., Lin, W. and Wong, C.P. (2010) Preparation of Highly Conductive Polymer Nanocomposites by Low Temperature Sintering of Silver Nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry*, **20**, 2018-2023. <https://doi.org/10.1039/b921072e>
- [8] Xia, Y., Xiong, Y., Lim, B. and Skrabalak, S.E. (2009) Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanocrystals: Simple Chemistry Meets Complex Physics. *Angewandte Chemie International Edition*, **48**, 60-103. <https://doi.org/10.1002/anie.200802248>
- [9] Wiley, B., Sun, Y., Mayers, B. and Xia, Y.N. (2005) Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanostructures: The Case of Silver. *Chemistry—A European Journal*, **11**, 454-463. <https://doi.org/10.1002/chem.200400927>
- [10] Wang, Y., Zheng, Y., Huang, C.Z. and Xia, Y.N. (2013) Synthesis of Ag Nanocubes 18-32 nm in Edge Length: The Effects of Polyol on Reduction Kinetics, Size Control, and Reproducibility. *Journal of the American Chemical Society*, **135**, 1941-1951. <https://doi.org/10.1021/ja311503q>
- [11] Liu, T., Li, D., Yang, D. and Jiang, M.H. (2011) Fabrication of Flower-Like Silver Structures through Anisotropic Growth. *Langmuir*, **27**, 6211-6217. <https://doi.org/10.1021/la200512m>
- [12] Zhang, Q., Li, N., Goebel, J., Lu, Z.D. and Yin, Y.D. (2011) A Systematic Study of the Synthesis of Silver Nanoplates:

- Is Citrate a “Magic” Reagent? *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 18931-18939. <https://doi.org/10.1021/ja2080345>
- [13] Lee, S., Jang, J., Park, T., *et al.* (2020) Electrodeposited Silver Nanowire Transparent Conducting Electrodes for Thin-Film Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 6169-6175. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b17168>
- [14] Singh, M., Rana, S. and Singh, A.K. (2022) Advanced Nanomaterials Utilized as Top Transparent Electrodes in Semi-Transparent Photovoltaic. *Colloid and Interface Science Communications*, **46**, Article ID: 100563. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100563>
- [15] Zhang, Q., Jiang, D., Xu, C., *et al.* (2020) Wearable Electrochemical Biosensor Based on Molecularly Imprinted Ag Nanowires for Noninvasive Monitoring Lactate in Human Sweat. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **320**, Article ID: 128325. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128325>
- [16] Ahn, Y., Lee, H., Lee, D. and Lee, Y.G. (2014) Highly Conductive and Flexible Silver Nanowire-Based Microelectrodes on Biocompatible Hydrogel. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **6**, 18401-18407. <https://doi.org/10.1021/am504462f>
- [17] Berchmans, S., Nirmal, R.G., Prabaharan, G., Madhu, S. and Yegnaraman, V. (2006) Templated Synthesis of Silver Nanowires Based on the Layer-by-Layer Assembly of Silver with Dithiodipropionic Acid Molecules as Spacers. *Journal of Colloid and Interface Science*, **303**, 604-610. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.07.060>
- [18] Song, J.H., Wu, Y., Messer, B., Kind, H. and Yang, P.D. (2001) Metal Nanowire Formation Using Mo_3Se_3^- as Reducing and Sacrificing Templates. *Journal of the American Chemical Society*, **123**, 10397-10398. <https://doi.org/10.1021/ja016818h>
- [19] Riveros, G., Green, S., Cortes, A., *et al.* (2006) Silver Nanowire Arrays Electrochemically Grown into Nanoporous Anodic Alumina Templates. *Nanotechnology*, **17**, 561-570. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/2/037>
- [20] Zhang, G., Sun, S., Banis, M.N., *et al.* (2011) Morphology-Controlled Green Synthesis of Single Crystalline Silver Dendrites, Dendritic Flowers, and Rods, and Their Growth Mechanism. *Crystal Growth & Design*, **11**, 2493-2499. <https://doi.org/10.1021/cg200256j>
- [21] Zhou, Y., Yu, S.H., Wang, C.Y., *et al.* (1999) A Novel Ultraviolet Irradiation Photoreduction Technique for the Preparation of Single-Crystal Ag Nanorods and Ag Dendrites. *Advanced Materials*, **11**, 850-852. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199907\)11:10<850::AID-ADMA850>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199907)11:10<850::AID-ADMA850>3.0.CO;2-Z)
- [22] Sun, Y.G., Gates, B., Mayers, B. and Xia, Y.N. (2002) Crystalline Silver Nanowires by Soft Solution Processing. *Nano Letters*, **2**, 165-168. <https://doi.org/10.1021/nl010093y>
- [23] Sun, Y., Mayers, B., Herricks, T. and Xia, Y.N. (2003) Polyol Synthesis of Uniform Silver Nanowires: A Plausible Growth Mechanism and the Supporting Evidence. *Nano Letters*, **3**, 955-960. <https://doi.org/10.1021/nl034312m>
- [24] Wiley, B., Sun, Y. and Xia, Y. (2005) Polyol Synthesis of Silver Nanostructures: Control of Product Morphology with Fe (II) or Fe (III) Species. *Langmuir*, **21**, 8077-8080. <https://doi.org/10.1021/la050887i>
- [25] Korte, K.E., Skrabalak, S.E. and Xia, Y.N. (2008) Rapid Synthesis of Silver Nanowires through a CuCl_1 - or CuCl_2 -Mediated Polyol Process. *Journal of Materials Chemistry*, **18**, 437-441. <https://doi.org/10.1039/B714072J>
- [26] Schuette, W.M. and Buhro, W.E. (2013) Silver Chloride as a Heterogeneous Nucleant for the Growth of Silver Nanowires. *ACS Nano*, **7**, 3844-3853. <https://doi.org/10.1021/nn400414h>
- [27] Wei, J., Li, X., Bian, F., *et al.* (2022) Synthesis of High Purity Silver Nanowires through a Silver Chloride-Mediated Polyol Method. *Inorganic Chemistry Communications*, **146**, Article ID: 110164. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110164>
- [28] Zhai, X., Wang, W., Jia, J. and Dong, P. (2021) One-Step Synthesis of Ultra-High Aspect Ratio Silver Nanowires for High-Performance Flexible Transparent Conductive Films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **32**, 15622-15632. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06111-1>
- [29] Ran, Y., He, W., Wang, K., Ji, S.L. and Ye, C.H. (2014) A One-Step Route to Ag Nanowires with a Diameter below 40 nm and an Aspect Ratio above 1000. *Chemical Communications*, **50**, 14877-14880. <https://doi.org/10.1039/C4CC04698F>
- [30] Skrabalak, S.E., Wiley, B.J., Kim, M., Formo, E.V. and Xia, Y.N. (2008) On the Polyol Synthesis of Silver Nanostructures: Glycolaldehyde as a Reducing Agent. *Nano Letters*, **8**, 2077-2081. <https://doi.org/10.1021/nl800910d>