

# 溶剂蒸发退火对银纳米线薄膜性能的增强

万慧军<sup>1,2</sup>, 魏优<sup>2</sup>, 钟远聪<sup>2</sup>, 章勇<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>井冈山大学数理学院, 江西 吉安 343009;

<sup>2</sup>华南师范大学光电子材料与技术研究, 广东 广州 510631

**摘要** 利用旋涂技术制备了银纳米线(AgNW)薄膜,对该 AgNW 薄膜进行了溶剂蒸发退火处理。研究了所制备的 AgNW 薄膜的方块电阻、光学透光率、微结构及表面形貌,分析了以退火处理的 AgNW 薄膜作为阳极的聚合物太阳能电池的电流-电压特性。结果表明,经过 3 h 的甲醇退火处理,薄膜方块电阻由退火前的 45.3  $\Omega/\square$ 减小到 28.7  $\Omega/\square$ ,最后达到饱和,薄膜的品质因数提高了 72.7%,薄膜的性能得到了增强;随醇溶剂沸点的增加,AgNW 薄膜方块电阻的降低程度变小。以退火处理的 AgNW 薄膜为阳极的聚合物太阳能电池的光电转换效率由退火前的 0.94%增大到 1.60%。退火 3 h 可获得性能较好的 AgNW 薄膜。

**关键词** 薄膜;薄膜性能;溶剂蒸发退火;银纳米线薄膜;方块电阻;聚合物太阳能电池

中图分类号 O484.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.053101

## Enhancement of Properties of Silver Nanowire Films Through Solvent Evapor Annealing

Wan Huijun<sup>1,2</sup>, Wei You<sup>2</sup>, Zhong Yuancong<sup>2</sup>, Zhang Yong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Mathematic and Physics, Jingtangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China;

<sup>2</sup> Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China

**Abstract** Silver nanowire (AgNW) films are prepared by using the spin-coating technique and processed by solvent vapor annealing. The sheet resistance, transmissivity, microstructures and surface morphologies of AgNW films are investigated. The current-voltage characteristics of the polymer solar cells with these annealed AgNW films as the anodes are analyzed. The results show that, after 3 h of methanol annealing treatment, the sheet resistance of these films decreases from 45.3  $\Omega/\square$  before annealing to 28.7  $\Omega/\square$ , and finally saturates. The quality factor increases by 72.7% and the properties of films are improved. With the increase of the boiling point of the alcoholic solvent, the decrease of the sheet resistance of AgNW films becomes slow. The photoelectric conversion efficiency of polymer solar cells with these annealed AgNW films as anodes increases from 0.94% before annealing to 1.60%. The AgNW films with superior properties can be obtained after 3 h of annealing treatment.

**Key words** thin films; properties of film; solvent evapor annealing; silver nanowire films; sheet resistance; polymer solar cells

**OCIS codes** 310.6870; 350.3850; 120.6200; 160.4236

## 1 引言

近年来,透明导电薄膜(TCF)被广泛应用于触摸屏、发光二极管和太阳能电池等光电器件中。氧化铟锡(ITO)<sup>[1]</sup>因其在可见光范围内具有高透光率

(大于 90%)和低方阻(约 10  $\Omega/\square$ )而被广泛用于制作 TCF。然而,ITO 薄膜的制备存在成本高、ITO 靶材利用率低等不足。为此,研究人员开发出了一些纳米功能材料来替代 ITO,如导电聚合物<sup>[2-3]</sup>、碳纳米管<sup>[4-5]</sup>、石墨烯<sup>[6-7]</sup>、纳米金属氧化物<sup>[8-10]</sup>和银纳

收稿日期: 2017-10-27; 收到修改稿日期: 2017-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61377065,61574064)、广东省科技计划项目(2014B090915004,2015B010132009)

作者简介: 万慧军(1972—),女,硕士,教授,主要从事透明导电薄膜方面的研究。E-mail: wanbj0820@163.com

\* 通信联系人。E-mail: zycq@senu.edu.cn

米线(AgNW)<sup>[11-15]</sup>等。其中,AgNW具有较高的电导率和热导率及较好的柔性,在室温下即可成膜,且可溶液加工,是替代ITO的理想透明导电电极材料之一<sup>[16]</sup>。但是,当前基于AgNW透明导电薄膜为电极的器件,如有机太阳能电池(OSCs)、有机发光二极管(OLEDs)等器件的光电性能、寿命和成品率均低于商业ITO器件的<sup>[17-19]</sup>。

Mutiso等<sup>[20]</sup>通过数值模拟,分析了AgNW间的有效接触电阻,对于直径在50~80 nm范围的AgNW导电薄膜,其有效接触电阻为1.5~2.5 k $\Omega$ 。为了减小AgNW间的接触电阻,必须引入一些后处理技术。Yang等<sup>[21-22]</sup>利用氧化物纳米粒子进行处理,将TiO<sub>2</sub>、ZnO作为表面包覆剂以改善AgNW间的接触。此外,还有研究人员采用纳米焊接等技术将AgNW间松散的结点焊接起来,增强其导电性<sup>[23-25]</sup>。Lee等<sup>[26]</sup>提出采用多次溶剂清洗和真空抽滤及超声辅助等技术去除AgNW表面的聚乙烯吡咯烷酮(PVP),有效减小了AgNW间的接触电阻,经过5次处理后,AgNW薄膜的方块电阻从初始值的71.1  $\Omega/\square$ 减小到18.9  $\Omega/\square$ ,相关透光率维持在94%。这些方法尽管有各自的优势,但大多存在工序复杂的问题。

溶剂蒸发退火(SVA)处理在有机薄膜晶体管<sup>[27]</sup>、OLEDs<sup>[28]</sup>和OSCs<sup>[29-30]</sup>等器件的制备中被大量采用,而其在AgNW透明导电薄膜中的应用研究鲜有报道。本文采用醇类溶剂蒸发退火来增强AgNW透明导电薄膜的性能。利用AgNW表面配体PVP容易溶解于水、醇等极性溶剂的特点,在不需要任何离心和加压等条件下,通过将AgNW透明导电薄膜放入含有醇类溶剂蒸汽的密闭容器中,去除了部分AgNW表面配体PVP,从而减小AgNW间的接触电阻,使得其薄膜的方块电阻减小,从而增强了薄膜的性能。分析了甲醇、乙醇和异丙醇(IPA)等不同醇溶剂蒸发退火对AgNW透明导电薄膜性能的影响,研究了以溶剂蒸发退火处理的AgNW透明导电薄膜为阳极的聚合物太阳电池的性能。

## 2 实验

### 2.1 实验材料及设备

实验中使用的甲醇、乙醇、异丙醇均购买于上海润捷化学试剂有限公司(分析纯);AgNW的异丙醇分散液(质量分数为1%)购买于杭州科创新材料科技有限公司;Clevios TM型聚3,4-乙撑二氧噻吩:聚对苯乙炔磺酸(PEDOT:PSS)购买于德国Heraeus公司;所用制备聚合物太阳电池的活性层材料(P3HT

和PC<sub>61</sub>BM)购买于台湾Luminescence Technology公司;实验中其他设备:超纯水机、台式匀胶机、超声波清洗机、恒温加热台、电热真空干燥箱、OLED实验手套箱(Universal 1200/780,米开罗那机电技术有限公司,上海)、高真空多源热蒸发沉积系统(OLED450B,圆芯光机电科技有限公司,苏州)。

### 2.2 样品制备及实验过程

AgNW透明导电薄膜采用旋涂工艺制备,AgNW的平均直径为30 nm,平均长度为20  $\mu\text{m}$ ,将AgNW分散在异丙醇中,其质量分数为0.12%。将玻璃片(15 mm $\times$ 15 mm)在洗液、去离子水、丙酮和异丙醇中分别超声波清洗10 min,随后放置在120  $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘烤以去除残余溶剂。然后,置于匀胶机上旋涂AgNW分散液,转速为2500 r/min,旋转60 s,将旋涂制备的AgNW薄膜放入滴有少量甲醇溶剂的培养皿中并加盖进行溶剂蒸发退火处理,如图1所示。调节溶剂蒸发退火处理时间以优化AgNW透明薄膜的方块电阻。

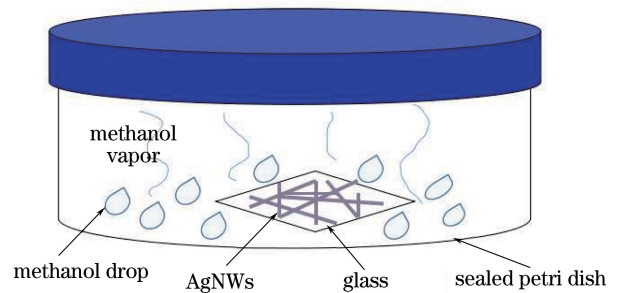


图1 甲醇溶剂蒸发退火示意图

Fig. 1 Schematic of methanol vapor annealing

将经溶剂蒸发退火处理的最佳AgNW透明导电薄膜作为聚合物太阳电池的透明导电阳极,在AgNW薄膜表面旋涂PEDOT:PSS层,旋涂速率为1200 r/min,时间为50 s,之后置于热台上加热30 min(温度为120  $^{\circ}\text{C}$ )以去除剩余水份。将旋涂PEDOT:PSS的AgNW薄膜移入充满氮气的手套箱中,将P3HT和PC<sub>61</sub>BM以1:0.8的质量比混合并配成体积分数为2%的二氯苯溶液,用滤膜孔径为0.45  $\mu\text{m}$ 的滤头滤除不溶的部分后将该过滤后的溶液旋涂在PEDOT:PSS表面上,旋涂速率为800 r/min,时间为45 s,并置于热台上退火15 min(温度为150  $^{\circ}\text{C}$ )以除残余溶剂。最后,将样品移入镀膜机中,在 $4 \times 10^{-4}$  Pa的低真空条件下蒸镀100 nm厚的Al层,并将Al层作为阴极。这样以AgNW薄膜为透明导电阳极的聚合物太阳电池器件就完全制备好了。

### 2.3 样品微结构表征和器件测试

利用四探针方阻测试仪(KDY-1型,昆德科技有限公司,中国)对经溶剂蒸发退火处理后的AgNW透明导电薄膜的方块电阻进行表征;利用紫外-可见光光度计(UV-VIS 8453型,Agilent Technologies Inc.,美国)对经退火处理后薄膜的光学透光率进行表征。溶剂蒸发处理对AgNW表面PVP(即样品的微结构)的影响采用透射电子显微镜(TEM,JEM-2100HR型,日本电子株式会社,日本)进行细致表征分析。在氮气保护的常温条件下,利用太阳光模拟器(Oriel 69911, Newport Corporation,美国)对聚合物太阳能电池器件进行性能测试,使用数字源表(2400型,吉时利仪器公司,美国)测试其电流-电压特性。采用原子力显微镜(AFM, BL222型,NT-MDT公司,俄罗斯)对AgNW透明导电薄膜的表面形貌进行测量。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 不同退火时间对AgNW薄膜性能的影响

为了研究AgNW透明导电薄膜的性能,利用四探针方阻测试仪和紫外-可见光光度计分别测试了AgNW薄膜在不同退火时间下的方块电阻和透射光谱,如图2所示。从图2(a)中可以看出,AgNW薄膜经甲醇溶剂蒸发退火处理后,其方块电阻在0~3 h内随退火时间的增大而逐渐减小,3 h后方块电阻趋近饱和。方阻随时间增加趋近饱和的趋势与醇类溶剂去除AgNW表面配体PVP的能力大小有关;此外,在溶剂蒸发退火处理过程中,两根原本接触的AgNW随PVP的去除而不再接触,变成悬空的状态,相应的方块电阻不但

没有减小,相反有变大的可能。经过3 h的甲醇溶剂蒸发退火处理,AgNW薄膜的方块电阻从 $45.3 \Omega/\square$ 减小到 $28.7 \Omega/\square$ ,减小了36.6%;但是,当退火时间达到7 h后,薄膜的方块电阻略有增大,这是由于长时间的溶剂蒸发退火处理导致AgNW发生了氧化。

透明导电薄膜的性能<sup>[31]</sup>可表示为

$$T(\lambda) = \left( 1 + \frac{188.5}{R_{sq}} \times \frac{\sigma_{op}}{\sigma_{DC}} \right)^{-2}, \quad (1)$$

式中 $T(\lambda)$ 是波长为 $\lambda$ 时的透光率(通常取 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 为参考值), $R_{sq}$ 是透明导电薄膜的方块电阻, $\sigma_{op}$ 是其光学电导率, $\sigma_{DC}$ 是其直流电导率, $\sigma_{DC}/\sigma_{op}$ 是该透明导电薄膜的品质因数。测量透明导电薄膜的方块电阻和透光率,根据(1)式即可计算相应薄膜的品质因数。高性能的透明薄膜应该具有较小的方块电阻和较高的透光率。图2(b)所示为透光率随甲醇溶剂蒸发退火处理时间的变化曲线,可以看出,甲醇溶剂蒸发退火处理对AgNW透明导电薄膜的透光率几乎没有影响。这主要是因为PVP在可见光范围内是透明的;此外,AgNW表面配体只是部分去除,不是完全去除(如图5所示)。因此,其品质因数主要是由薄膜的方块电阻决定。从图2(a)中可以看出,随着甲醇溶剂蒸发退火时间的增加,品质因数的值也逐渐增大,当溶剂蒸发退火时间达到3 h时,品质因数由退火前的108.9增大到188.1,增大72.7%;当溶剂蒸发退火时间到达7 h后,由于PVP进一步被溶蚀,AgNW表面发生氧化,AgNW薄膜的方块电阻略有增大,最终使AgNW薄膜的品质因数减小。因此,3 h为AgNW薄膜溶剂蒸发退火的最优时间。

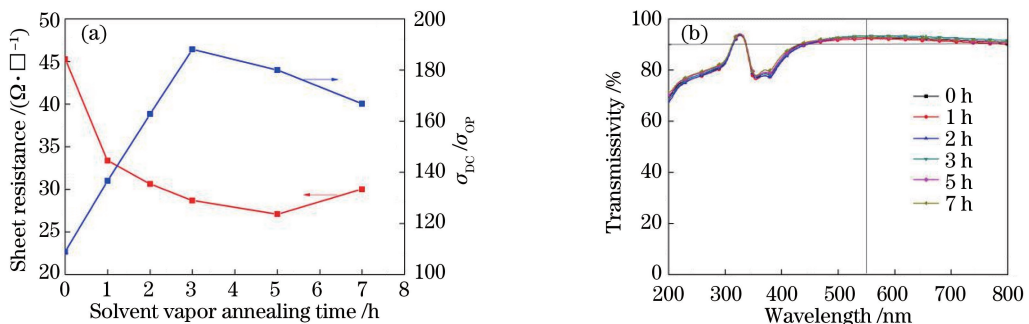


图2 AgNW薄膜的(a)方阻和品质因数及(b)透光率随甲醇溶剂蒸发退火处理时间的变化

Fig. 2 (a) Sheet resistance, quality factor, and (b) transmissivity of AgNW films at different solvent vapor annealing time

### 3.2 不同种类的醇溶剂蒸发退火对AgNW薄膜性能的影响

为了进一步探讨溶剂蒸发退火处理对AgNW

薄膜性能的影响,采用了不同种类的醇溶剂对AgNW薄膜进行了蒸发退火。图3所示为经甲醇、乙醇和异丙醇等醇溶剂蒸发退火处理后的AgNW

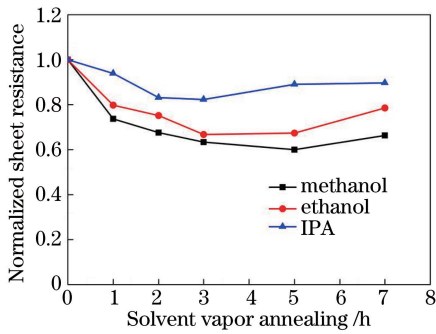


图3 经不同溶剂蒸发退火处理后的 AgNW 薄膜的方块电阻

Fig. 3 Sheet resistance of AgNW films after different solvent vapor annealing

薄膜方块电阻。

乙醇、异丙醇溶剂蒸发退火处理与甲醇溶剂蒸发退火处理对 AgNW 薄膜方块电阻的影响类似,随溶剂蒸发处理时间的增加,AgNW 薄膜方块电阻先减小,然后达到饱和,AgNW 薄膜的性能得到增强。此外,在相同的退火时间内,经甲醇溶剂蒸发退火处理后的 AgNW 薄膜的方块电阻降低程度最大,经异丙醇溶剂蒸发退火处理后的 AgNW 薄膜的方块电阻降低程度最小。这与甲醇、乙醇和异丙醇溶剂的沸点及各溶剂与 PVP 分子间的相互作用有关:一方面,这三种醇类溶剂中甲醇的沸点最低,最容易发生蒸发;另一方面,从图 4 所示的 PVP 分子在甲醇、乙醇和异丙醇溶剂中 C6 位置处的  $^{13}\text{C}$  同位素核

磁共振(NMR)谱中可以看出,PVP 在甲醇溶剂中 C6 碳谱峰位的化学位移最大,而异丙醇溶剂中 C6 碳谱峰位的化学位移最小。这说明甲醇与 PVP 分子间发生了强相互作用,这种强相互作用有利于在甲醇溶剂蒸发退火处理过程中使 PVP 更容易从 AgNW 上脱离。

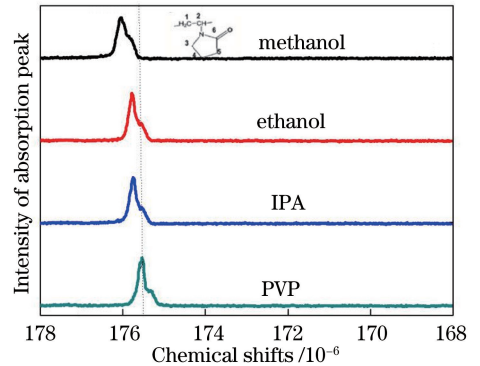


图4 PVP 在不同溶剂中的 C6 的  $^{13}\text{C}$  NMR 谱

Fig. 4  $^{13}\text{C}$  NMR spectra for C6 of PVP in different solvents

### 3.3 AgNW 微结构的表征及分析

图 5 所示为 AgNW 经 3 h 溶剂蒸发退火处理前后的 TEM 形貌。结果显示,AgNW 在溶剂蒸发退火处理前,其表面被厚厚的 PVP 配体包覆,如图 5(a)所示,而溶剂蒸发退火处理 3 h 后,其表面配体 PVP 的厚度显著减小,如图 5(b)所示。

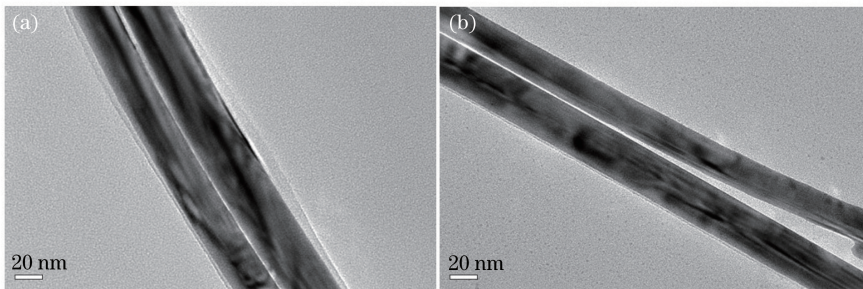


图5 AgNW 溶剂蒸发退火(a)前和(b)后的 TEM 形貌

Fig. 5 TEM morphologies of AgNWs (a) before and (b) after solvent vapor annealing

溶液法合成 AgNW 的表面存在配体 PVP,表面配体 PVP 过多容易导致 AgNW 发生聚集,从而增大了 AgNW 间的接触电阻,PVP 过少容易使 AgNW 产生沉淀,不利于加工成膜,通常采用离心方式来调节 AgNW 表面配体 PVP 的厚度。由于 PVP 易溶于水、醇等极性较强的溶剂,因此当 AgNW 薄膜置于醇溶剂的密闭容器中进行溶剂蒸发退火处理时,随着溶剂的蒸发,在 AgNW 表面形成的蒸气小液滴会溶解其表面的 PVP,PVP 随液滴聚集而脱离 AgNW;随着溶剂蒸发退火时间的

增长,PVP 的厚度逐渐减小;又因为 PVP 具有绝缘性,所以其厚度的减小有助于减小 AgNW 薄膜中银纳米线间的接触电阻,进而减小其薄膜的方块电阻,如图 6 所示。醇溶剂蒸发退火处理使 AgNW 表面配体 PVP 的厚度变小,最终使其薄膜的方块电阻减小,这与图 2(a)和图 3 所示的结果一致,即在溶剂蒸发退火前 3 h 内,AgNW 薄膜的方块电阻逐渐减小,3 h 后变化不大,但是 7 h 后由于 PVP 厚度进一步减小,其表面易于被氧化从而使其方块电阻增大。

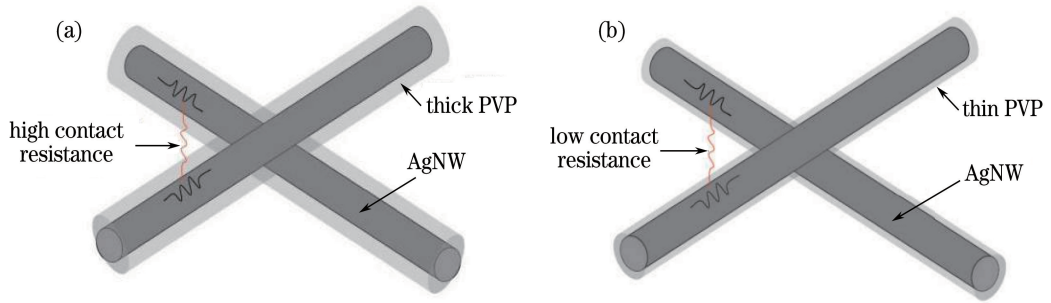


图 6 AgNW 溶剂蒸发退火(a)前和(b)后的接触电阻示意图

Fig. 6 Schematic of contact resistance of AgNWs (a) before and (b) after solvent vapor annealing

### 3.4 对溶剂蒸发退火增强 AgNW 薄膜性能的验证

为了验证溶剂蒸发退火对 AgNW 薄膜性能的增强作用,将经甲醇溶剂蒸发退火处理的 AgNW 透明导电薄膜作为聚合物太阳能电池的阳极制备光伏器件,相应的聚合物太阳能电池器件结构为 Glass/AgNWs/PEDOT:PSS/P3HT:PC<sub>61</sub>BM/Al。以 AgNW 透明导电薄膜为阳极的聚合物太阳能电池在模拟太阳光辐射度强度为  $100 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  下的电流密度-电压( $J$ - $V$ )特性曲线如图 7 所示。分析可知,当 AgNW 经过甲醇溶剂蒸发退火处理后,器件开路电压( $V_{oc}$ )、短路电流密度( $J_{sc}$ )、填充因子( $FF$ )等分别从未处理的  $0.399 \text{ V}$ 、 $6.04 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $38.9\%$  增大到  $0.440 \text{ V}$ 、 $7.60 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $47.7\%$ ;器件的串联电阻( $R_s$ )从  $29.92 \Omega\cdot\text{cm}^2$  减小到  $20.91 \Omega\cdot\text{cm}^2$ ,并联电阻( $R_{sh}$ )则从  $198.8 \Omega\cdot\text{cm}^2$  增大到  $360.1 \Omega\cdot\text{cm}^2$ ;聚合物太阳能电池器件的光电转换效率从未处理的  $0.94\%$  增大到  $1.60\%$ ,因此聚合物太阳能电池器件的性能得到了改善。

甲醇溶剂蒸发退火处理可减小 AgNW 透明导电薄膜的方块电阻,进而改善聚合物太阳能电池的器件性能。另外,溶剂蒸发退火处理也可以改善其薄

膜的表面粗糙度(RMS),从而改善聚合物太阳能电池的器件性能。图 8(a)和图 8(b)所示分别为未经过甲醇溶剂蒸发退火处理和经过退火处理 3 h 后的薄膜表面形貌,结果显示,甲醇溶剂蒸发退火处理能使 AgNW 薄膜的表面粗糙度从  $20.4 \text{ nm}$  减小到  $16.1 \text{ nm}$ ,有利于降低器件阴阳电极间活性层短路的风险,从而改善器件的性能。聚合物光伏器件性能的改善也验证了溶剂蒸发退火对 AgNW 薄膜性能的增强作用。

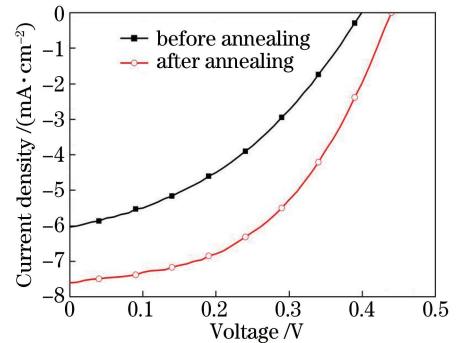


图 7 以 AgNW 为阳极的聚合物太阳能电池的  $J$ - $V$  曲线

Fig. 7  $J$ - $V$  curve of polymer solar cells with AgNW films as anodes

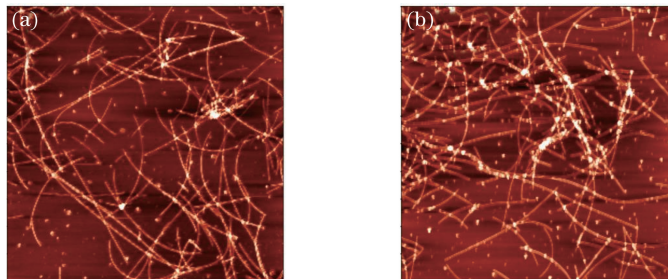


图 8 AgNW 薄膜经甲醇(a)退火前和(b)退火后的表面形貌

Fig. 8 Surface morphologies of AgNW films (a) before and (b) after methanol solvent vapor annealing

## 4 结 论

利用 AgNW 表面配体 PVP 易溶于水、醇等极性溶剂的特点,将旋涂法制备的 AgNW 薄膜放入含有醇类溶剂的密闭容器中进行溶剂蒸发退火处理,结果显示,醇类溶剂蒸发退火处理能有效减小 AgNW 透明导电薄膜的方块电阻。随着溶剂蒸发退火时间的增加,AgNW 薄膜的方块电阻先减小,然后略有增大。溶剂蒸发退火对其薄膜的透光率基本没有影响,但改善了薄膜的表面形貌。经甲醇溶剂蒸发退火处理 3 h 后,AgNW 薄膜的方块电阻从  $45.3 \Omega/\square$  减小到  $28.7 \Omega/\square$ ,薄膜的品质因数增大了 72.7%,获得了最优的 AgNW 薄膜,AgNW 薄膜的性能得到了增强。随着醇溶剂沸点的增加,AgNW 薄膜的方块电阻降低程度变小。以甲醇溶剂蒸发退火处理的 AgNW 薄膜为阳极的聚合物光伏器件的光电转换效率由退火前的 0.94% 增大到 1.60%,证实了醇溶剂蒸发退火对 AgNW 薄膜性能的增强作用。表明了醇溶剂蒸发退火处理是一种工艺简单、成本低、可增强 AgNW 透明导电薄膜性能的有效方法。

## 参 考 文 献

- [1] Ellmer K. Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(12): 809-817.
- [2] Ouyang J, Yang Y. Conducting polymer as transparent electric glue[J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(16): 2141-2144.
- [3] Na S I, Kim S S, Jo J, *et al.* Efficient and flexible ITO-free organic solar cells using highly conductive polymer anodes[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(21): 4061-4067.
- [4] Wu Z C, Chen Z H, Du X, *et al.* Transparent, conductive carbon nanotube films[J]. *Science*, 2004, 305(5688): 1273-1276.
- [5] Niu C. Carbon nanotube transparent conducting films[J]. *MRS Bulletin*, 2011, 36(10): 766-773.
- [6] Kim K S, Zhao Y, Jang H, *et al.* Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes[J]. *Nature*, 2009, 457(7230): 706-710.
- [7] Bae S, Kim H, Lee Y, *et al.* Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(8): 574-578.
- [8] Wang J X, Hong R J, Tao C X, *et al.* Fabrication and surface enhanced Raman spectroscopy of nano-Cu<sub>2</sub>O thin

films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0816004.

王进霞,洪瑞金,陶春先,等. 纳米 Cu<sub>2</sub>O 薄膜的制备及其表面增强拉曼光谱[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0816004.

- [9] Zhu X L, Xiao J, Ma Z. Wide spectrum optical properties for HfO<sub>2</sub> films[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 033101.  
朱晓龙,肖峻,马孜. 氧化铪薄膜的宽光谱光学特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 033101.
- [10] Zhang S B, Zuo D W, Lu W Z, *et al.* Optical and electrical properties of vanadium pentoxide films deposited on different substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0431001.  
张圣斌,左敦稳,卢文壮,等. 基于不同衬底的五氧化二钒薄膜光电特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0431001.
- [11] Gaynor W, Lee J Y, Peumans P. Fully solution-processed inverted polymer solar cells with laminated nanowire electrodes[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(1): 30-34.
- [12] Chen C C, Dou L T, Zhu R, *et al.* Visibly transparent polymer solar cells produced by solution processing[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(8): 7185-7190.
- [13] Leem D S, Edwards A, Faist M, *et al.* Efficient organic solar cells with solution-processed silver nanowire electrodes[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(38): 4371-4375.
- [14] Jin Y, Deng D, Cheng Y, *et al.* Annealing-free and strongly adhesive silver nanowire networks with long-term reliability by introduction of a nonconductive and biocompatible polymer binder[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(9): 4812-4818.
- [15] Gaynor W, Burkhard G F, McGehee M D, *et al.* Smooth nanowire/polymer composite transparent electrodes[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(26): 2905-2910.
- [16] Ye S R, Rathmell A R, Chen Z F, *et al.* Metal nanowire networks: The next generation of transparent conductors[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(39): 6670-6687.
- [17] Sun Y, Gates B, Mayers B, *et al.* Silver nanowires by soft solution processing[J]. *Nano Letters*, 2002, 2(2): 165-168.
- [18] Li X, Wang L, Yan G. Review: Recent research progress on preparation of silver nanowires by soft solution method and their applications[J]. *Crystal Research and Technology*, 2011, 46(5): 427-438.

- [19] Lee J Y, Connor S T, Cui Y, *et al.* Solution-processed metal nanowire mesh transparent electrodes[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(2): 689-692.
- [20] Mutiso R M, Sherrott M C, Rathmell A R, *et al.* Integrating simulations and experiments to predict sheet resistance and optical transmittance in nanowire films for transparent conductors[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(9): 7654-7663.
- [21] Zhu R, Chung C H, Cha K C, *et al.* Fused silver nanowires with metal oxide nanoparticles and organic polymers for highly transparent conductors[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(12): 9877-9882.
- [22] Kim A, Won Y, Woo K, *et al.* Highly transparent low resistance ZnO/Ag nanowire/ZnO composite electrode for thin film solar cells[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 1081-1091.
- [23] Garnett E C, Cai W S, Cha J J, *et al.* Self-limited plasmonic welding of silver nanowire junctions[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(3): 241-249.
- [24] Lee J, Lee P, Lee H B, *et al.* Room-temperature nanosoldering of a very long metal nanowire network by conducting-polymer-assisted joining for a flexible touch-panel application[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(34): 4171-4176.
- [25] Song T B, Chen Y, Chung C H, *et al.* Nanoscale joule heating and electromigration enhanced ripening of silver nanowire contacts [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(3): 2804-2811.
- [26] Lee J, Lee I, Kim T S, *et al.* Efficient welding of silver nanowire networks without post-processing[J]. *Small*, 2013, 9(17): 2887-2894.
- [27] Dickey K C, Anthony J E, Loo Y. Improving organic thin-film transistor performance through solvent-vapor annealing of solution-processable triethylsilylethynyl anthradithiophene [J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(13): 1721-1726.
- [28] Berggren M, Gustafsson G, Inganäs O, *et al.* Thermal control of near-infrared and visible electroluminescence in alkyl-phenyl substituted polythiophenes[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(12): 1489-1491.
- [29] Li G, Shrotriya V, Huang J S, *et al.* High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(11): 864-868.
- [30] Miller S, Fanchini G, Lin Y Y, *et al.* Investigation of nanoscale morphological changes in organic photovoltaics during solvent vapor annealing[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18(3): 306-312.
- [31] Hecht D S, Hu L, Irvin G. Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(13): 1482-1513.