# 透明电极用银纳米线尺寸与光电性能相关性综述

张楷力, 堵永国\*, 王 震

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院 材料科学与工程系,长沙 410073)

**摘 要:**介绍了银纳米线透明电极光电性能的相关理论。根据国外研究团队建立的相应模型,结合 目前透明电极主流应用对银纳米线的性能要求,阐释了银纳米线的尺寸与透明电极的光电性能之间 的联系,给出了评判电极光电综合性能的重要参数和满足透明电极应用的银纳米线尺寸具体要求, 为银纳米线的合成提供了理论参考。

关键词:金属纳米材料;银纳米线;透明电极;尺寸;光电性能;理论 中图分类号:TG146.3<sup>+</sup>2,TM241 文献标识码:A 文章编号:1004-0676(2016)01-0068-08

# **Review on Relationship between Optoelectronic Properties and Size of Silver Nanowire for Transparent Electrode**

ZHANG Kaili, DU Yongguo<sup>\*</sup>, WANG Zhen

(Department of Materials Science and Technology, Academy of Astronautics Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The relevant theories of optoelectronic properties for silver nanowire transparent electrode are introduced. Through introducing the simulations made by the foreign research groups and the optoelectronic demands of current applications, the relationship between nanowire size and electrode properties is demonstrated. Critical parameters to evaluate the synthetic optoelectronic properties and favorable nanowire size to meet the application demand are given, which provide theoretical reference for the synthesis of silver nanowires.

Key words: metal materials; silver nanowire; transparent electrode; size; optoelectronic properties; theory

透明电极是能够同时实现透光和导电的功能膜 层,普遍应用于触摸屏、有机太阳能电池等器件。 长期以来,氧化铟锡(ITO)<sup>[1]</sup>导电玻璃几乎垄断了透 明电极材料市场。但是随着电子产品的发展,ITO 的抗弯性能差、制备成本高等问题制约了其应用。 采用新型纳米材料,例如碳纳米管(CNT)<sup>[2-4]</sup>、石墨 烯<sup>[5]</sup>和银纳米线(AgNW)<sup>[6-10]</sup>制成的透明电极不仅具 有较好的透光和导电性能,而且适应新一代电子产 品大面积、低成本、柔性化的发展趋势,很有可能 成为导电玻璃未来的替代品<sup>[11]</sup>。表 1<sup>[12]</sup>为几类透明 电极的综合性能。

由表1可知, 银纳米线透明电极更胜一筹, 其

综合光电性能已经接近甚至超过 ITO 导电玻璃,成为新型透明电极的研究热点。

#### 表1 几类透明电极的综合性能

Tab.1	Synthetic	properties	of several	transparent	electrodes
-------	-----------	------------	------------	-------------	------------

性能	ITO	CNT	石墨烯	Ag 栅格	AgNW
膜电阻	较低	较高	高	低	较低
透过率	较高	高	较高	高	中
稳定性	较高	较高	较好	好	好
柔性	差	好	好	差	好
大面积成膜	难	易	易	难	易
制备成本	高	较高	高	高	低

收稿日期: 2015-05-25

第一作者:张楷力,男,硕士研究生,研究方向:纳米银材料及电子浆料。E-mail: kellybox315@sina.com

<sup>\*</sup>通讯作者: 堵永国, 男, 教授, 研究方向: 金属功能材料。E-mail: nudtdyg@126.com

透明电极的关键性能指标为光透过率(T)、方阻 (R<sub>s</sub>)及雾度,它们的物理意义及计算公式见后文。 AgNW 透明电极并非为完整膜层,而是由随机分布 的银纳米线相互搭接而成的导电平面网络(如图 1)。 由于导电网络仅由银和孔隙构成,AgNW 透明电极 的性能主要取决于银纳米线的尺寸(直径及长径 比)、线间接触以及线的分布状况。金属银本身不透 明,难以同时满足 AgNW 透明电极的透光性与导电 性 2 个关键性能指标。



图1 覆盖在玻璃上的银纳米线网络

Fig.1 Silver nanowire network coated covered on glass

从应用角度出发,应综合考虑 AgNW 透明电极 的光电性能。透明电极的主要应用领域例如触摸屏 <sup>[13-14]</sup>、太阳能电池<sup>[15-17]</sup>以及 OLED<sup>[18-20]</sup>等,它们对 光电综合性能有不同的要求(如表 2 所列),这给 AgNW 透明电极的研发明确了目标<sup>[21]</sup>。

#### 表 2 主要应用领域对透明电极光电性能的要求

Tab.2 Optoelectronic demands for transparent electrode in its

major applications				
应用	透明性(T)	导电性( $R_s$ )	其他性能要求	
光伏电池	>95%	$< 10 \Omega$	功函数,稳定性	
OLED 显示器	>85%	$< 10 \Omega$	功函数,雾度≤2%	
薄膜加热器	>80%	$< 10 \Omega$	柔性	
触摸屏	>90%	<200 Ω	柔性,雾度≤1%	

近年来,随着对银纳米线合成和透明电极制备 技术研究的深入,目前合成的银纳米线长度约为 5~300 µm<sup>[22]</sup>,直径约为 20<sup>[23]</sup>~200 nm<sup>[22]</sup>。由不同尺 寸的纳米线制成的透明电极性能相差巨大。为准确 建立银纳米线的尺寸因素(长度、直径、分布等)与 透明电极的光电性能(透过率、方阻、雾度)之间的 联系,一些研究者在实验数据的基础上建立了物理 模型并给出了半定量的理论,用于指导银纳米线的 合成和透明电极制备。本文旨在介绍国际上主流的 银纳米线导电网络光电性能理论,并指出最优化光 电性能的透明电极用银纳米线的理想尺寸。

# 1 光电优值理论

当考虑块状物体的光学性能时,透过率 T 常用 下式计算:

$$T = (1 + \sigma_{\rm op} t \, z_0 / 2)^{-2} \tag{1}$$

式中, t 为介质层厚度, z<sub>0</sub>为常数, σ<sub>op</sub>为材料光阻 系数。由式(1)可知透过率 T 与 σ<sub>op</sub>以及介质膜厚度 t 成负相关,其值通常由紫外可见分光光度计测出。 方阻 R。是材料导由性能的直观表现。空义为

$$R_{\rm s} = (\sigma_{\rm DC,B} t)^{-1} \tag{2}$$

式中, σ<sub>DC,B</sub> 为块体(Bulk)材料的直流电导率。方阻 值可以通过测出膜厚和电阻率算出,也可以通过四 探针方阻测试仪直接测出。

综合式(1)、(2)可以得到[24]:

$$T = [1 + z_0 \sigma_{\rm op} / (2R_{\rm s} \sigma_{\rm DC,B})]^{-2}$$
(3)

式(3)中引出了一个重要参数  $\sigma_{op}/\sigma_{DC,B}$ ,即光电 优值(Figure of Merit, FoM)。可以看出,光电优值 与膜厚无关,是材料本身的特性,FoM越大,意味 着在相同  $R_s$ 下 T更大,表明材料的综合光电性能越 好。由于 T和  $R_s$ 均可以通过实验直接测得,有研究 者综合了一些实验数据给出了几类常用透明电极材 料的 T、 $R_s$ 及 FoM 值的分布状况,如图 2 所示。



图 2 几类常见透明电极材料透过率、方阻及光电优值<sup>[17]</sup> Fig.2 Plot of transmittance *vs* sheet resistance for different transparent electrode materials, the FoM values are also shown

由图 2 可见, AgNW 透明电极的光电优值不如 导电玻璃,但在石墨烯和碳纳米管透明电极之上。 而在最近的文献<sup>[12]</sup>中, AgNW 透明电极的光电优值 已经超过了 ITO,如图 3 所示。



Fig.3 Comparison of optoelectronic properties between Lee's work and previous literature

进一步研究表明, FoM 并不能准确地反映材料 的光电性能, Sukanta 等<sup>[25]</sup>发现  $\sigma_{DC,B}$  与透明电极膜 厚 t 有关,指出  $\sigma_{DC} \propto (t-t_c)^n$ ,其中  $t_c$  是膜的临界厚 度, n 为逾渗指数(此时的电导率  $\sigma$  不一定是块体 B 的,也可以是薄膜的,故去除 B,表述为  $\sigma_{DC}$ )。在 t 与  $t_c$ 接近时,可以得到:

$$T = [1 + (z_0/R_s)^{1/(n+1)}/\Pi]^{-2}$$
(4)

式(4)中的Ⅱ是考虑到膜厚影响后的光电优值:

 $\Pi = 2[(\sigma_{DC,B}/\sigma_{op})/(z_0 t_{min} \sigma_{op})]^{1/(n+1)}$ (5) 式(5)中的  $t_{min}$ 为膜层厚度对  $\sigma_{DC}$ 出现显著影响时的

临界厚度值。

对比式(5)和式(3)可发现,  $\Pi$ 的大小同样反映材 料的综合光电性能, 但在  $\Pi$ 的计算式中还需要考虑 指数 n的影响, 且 n 越小综合性能越好。  $\Pi$  和 n 可 在实验测得透明电极的 T 和  $R_s$  后, 由作图法得出。 研究发现, 银纳米线的直径、长度等尺寸参数对 n和  $\Pi$  值的影响很大。表 3 为不同尺寸 AgNW 网络 的 n 和  $\Pi$  值。

由表 3 可知,银纳米线直径越小、长度越长, AgNW 导电网络的 n 值越小、 $\Pi$  值越大,即细而长 的银纳米线制成的导电网络在相同的 T 下具有更低 的  $R_s$ ,因而有更佳的光电综合性能。Sorel 等<sup>[24]</sup>还 根据此模型给出了结论:只有在 D<25 nm 时, $R_s^{T=90\%}$  $<10 \Omega/\Box$ 才能成立。

表3透明电极的光电性能参数与银纳米线尺寸的关系[24]

Tab.3 Relationship between optoelectronic value and nanowire size for transparent electrode

线长 <i>L</i> /μm	直径 D/nm	n	П	
2	40	2.01	5.39	
20.6	75	1.08	30.28	
32	40	0.89	101.19	

光电优值理论基于块体透明材料的 T 和 R<sub>s</sub>导出 了反映材料综合光电性能的 FoM、Π 和 n 值,使得 不同材料以及不同尺寸银纳米线的光电综合性能对 比成为了可能。但是该理论并没有直观的物理模型, 也没有说明为什么细而长的银纳米线组成的网络拥 有更好的综合光电性能;另外由于厚膜与薄膜公式 存在差异,即使是同样的银纳米线在稀疏或密集覆 盖时光电优值也会有显著差异。由于存在这些不足, 光电优值理论的指导作用有限。

# 2 随机网络理论

为解决光电优值理论缺乏物理模型的问题,研究者随后提出了专门针对于 AgNW 导电网络的导电性和透光性的计算方法。Pike 等<sup>[26]</sup>首先提出了利用蒙特卡洛散点法估算纳米线网络临界密度的方法:在平面上随机放置长度有限,粗细忽略不计的直导线,开始阶段导线数量的增加并未使平面两端连通因此整个平面并不导电,当导线数量增加到一个临界值时平面两端连通,此时平面成为导体,电阻迅速下降。导通时线的临界密度 N<sub>c</sub>为:

$$N_{\rm c}L^2 = 5.71$$
 (6)

式中 L 为导线长度,该公式反映了随着纳米线长度的增加,导通整个平面需要的纳米线数量越少。

方阻则与 N。存在直接的关系<sup>[27]</sup>:

$$R_{\rm s} \propto M/(N_{\rm s} - N_{\rm c})^t \tag{7}$$

式中 *M* 为材料常数, *N*<sub>s</sub> 为纳米线实际密度, *t* 为指数。式(7)说明,在相同的纳米线密度下,方阻随着 *N*<sub>c</sub> 的减小而减小,即随着 *L* 的增大而减小。这充分证明了较长的纳米线有利于提高电极的导电性。

AgNW 导电网络的透光率计算采用最简单的 "布条"遮盖模型。在一个平面上分布着面密度为 *N*,长度为 *L*,宽度为 *D*的布条,在忽略交叉面积 的情况下可知被布条覆盖的面积为:

$$A_{c}=NLD \tag{8}$$

由于纳米线的直径远小于光的波长,"布条"可能会对光有散射作用,因此被覆盖的部分并不是完全不透光。这种散射可用一个唯像的消光系数 *a*<sub>1</sub>来表征,因此透光率为:

$$T\% = 100 - a_1 A_2$$
 (9)

按照式(9)模型, *T* 与 *A*<sub>c</sub>成简单线性关系(如图 4 所示),且在线长 *L* 不变的情况下降低直径 *D* 能够使纳米线网络在不降低导电性的前提下进一步提高透光性。



与遮盖面积 A。的关系

Fig.4 A plot of electrode transmittance vs fractional area coverage  $(A_c)$  of nanowires with different length and same width

但是该模型并未考虑纳米线导电性和直径D的 关系,这与事实明显不符。因为当材料的尺度达到 纳米级别时,进一步减小直径意味着更大的比表面 积,而这会造成更剧烈的表面电子散射,必然增大 方阻<sup>[28]</sup>。现在的问题在于随着 D 的减小, R<sub>s</sub>和 T 的增加哪一项更快? Bergin 等<sup>[29]</sup>通过有限差分时域 模型 (FDTD) 估算出了电导率与消光率的比值 σ<sub>DC</sub>A/σ<sub>ext</sub>与直径D 的关系,表达式为:

$$\sigma_{ext}=C_{ext}/(DL)$$
 (10)  
其中: A 为银纳米线的截面积,  $\sigma_{ext}$  为消光截面系数,  
 $C_{ext}$  是真正的消光截面积,其大小同样与 D 和 L 有  
关,因此  $\sigma_{DC}A/\sigma_{ext}$  直接反映了光电综合性能随 D 的  
变化,如图 5 所示。

由图 5 可知,银纳米线直径约 50 nm 时  $\sigma_{DC}A/\sigma_{ext}$ 最小,而随着 D 的继续减小,该比例显著增大。这意味着进一步降低银线尺寸有利于改善 AgNW 导电网络的光电综合性能。Bergin 等<sup>[29]</sup>认为进一步降低纳米线的直径将可以显著提升网络的透光率并预

测,由直径 30 nm 的纳米线组成的网络在覆盖率为 0.2 时仍能保证 90%的透过率。



图 5 电导消光比  $\sigma_{DC}A/\sigma_{ext}$  随 AgNW 直径 D 的变化规律<sup>[29]</sup> Fig.5 Plot of  $\sigma_{DC}A/\sigma_{ext}$  vs Ag nanowire diameter (D)

Bergin 等虽合理地解释了 AgNW 的长度与直径 对透光率以及方阻的影响,但并未将 AgNW 的直径 与长度综合考虑。对于 AgNW 的制备来说,无限增 加长度和减小直径是不现实的。另外,直径过小的 银纳米线由于电子强烈的表面散射,电阻率将急剧 增大。因此需要确定 AgNW 的最佳尺寸以同时满足 透明电极的透光性和导电性。

# 3 有效电阻理论

随着研究的深入,人们发现将 AgNW 透明电极 看做均匀的导电网络并不合理。Hu 等<sup>[30]</sup>发现采用 主流的多醇法制备的 AgNW 其网络的电阻主要来 自于纳米线之间的接触点而非纳米线本身,前者的 电阻为后者的 10<sup>6</sup> 倍以上。这是因为在多醇法合成 中需要使用不导电的 PVP (聚乙烯吡咯烷酮),后 者对银纳米线的包覆在接触点处阻碍了银纳米线之 间的直接接触。此外,接触点处由于应力较大,容 易发生化学反应而导致电阻增大[31]。在此基础上, Mutiso 等<sup>[32]</sup>进一步发展出了有效电阻理论。在该理 论中, AgNW 电极的方阻不再通过整体电导率或线 密度计算,而是由相邻线之间的电阻统计而来。在 实验中,选取一小块区域,将所有整个纳米线网络 的节点处看作有效电阻 R<sub>eff</sub>, 而线本身看作导线, 如图 6 所示,则各处电流和方阻可以通过 Kirchoff 定律解出。



图 6 银纳米线网络的有效电阻模型(圆点为接触电阻存在处) Fig.6 A model of effective resistance for silver nanowire network (dots indicate the contact resistance)

研究发现,  $R_{\rm eff}$  既与单位面积中线的覆盖率  $A_{\rm c}$ 无关,也与银线的尺寸无关,而完全取决于纳米线 间的接触状况,根据 Mutiso 等的估算,其平均值通 常在 1.5~2.5 k $\Omega$ 。当线的数量较多时,所选小区域 的方阻可以近似为整个导电网络方阻。在有效电阻 模型中,区域方阻 R<sub>s</sub>主要由通路中接触点的数量决 定,而后者又取决于银纳米线的长度和覆盖率 A<sub>c</sub>。 通常银纳米线越长,搭接网络时所需有效接触点越 少。另外,在电路已经导通后继续增加线的密度仅 仅相当于在原有的基础上并联更多电阻,因此当 A<sub>c</sub> 超过一定值后电极的方阻减小程度变缓。同时,"布 条"覆盖理论仍然适用,因此 A<sub>c</sub>仍然由长度和直径 共同影响。为统一参数,有效电阻理论中选取长径 比 L/D 这一有着明确物理意义的变量来衡量不同尺 寸的银纳米线的光电综合性能。通过有效电阻理论 可以得到不同尺寸的 AgNW 网络 A<sub>c</sub>与 R<sub>s</sub>、T 的关 系。图 7 显示了透明电极性能与纳米线尺寸的关系。





Fig.5 Relationship of electrode properties for different nanowire size (L/D) in effective resistance theory

图 7(a)为不同长径比下 AgNW 电极  $A_c \subseteq R_s$ 的 关系。由图可见在相同的  $A_c$ 下高 L/D 值的 AgNW 电极具有更小的  $R_s$ 。图 7(b)则反映了高 L/D 值的银 纳米线有着更好的光电综合电性能,并半定量地预 测出透明电极性能与长径比的关系,例如若使  $R_s^{T=90\%} < 10 \Omega/\Box$ ,则银线的长径比应在 800 以上。 值得一提的是有效电阻  $R_{eff}$ 并非一成不变,合适的 后处理可以显著降低该阻值,例如在纳米线网络上 镀金, $R_{eff}$ 可降低至 0.5 k $\Omega^{[30]}$ 。

有效电阻理论以覆盖率  $A_c$ 为中间变量,从相对 固定的有效电阻出发,成功建立起长径比与透过率 及导电性之间半定量的关系,与实验结果高度吻合, 为 AgNW 尺寸的选择指明了方向。当 L/D>800 时,  $R_s^{T=90\%} < 10 \ \Omega/\Box$ 这一结论也已经成为很多研究者 对纳米线合成质量的判据。

### 4 散射与雾度理论

式(9)已经说明"布条"覆盖模型中银纳米线并 不是完全不透光。事实上,由于银纳米线的尺寸远 小于可见光波长,散射效应是非常明显的。在散射 效应存在时,透过率更加科学的表达式为<sup>[29]</sup>:

$$T\% = e^{-AF \times \sigma_{\text{ext}}} \tag{11}$$

式中,指数项 AF 为银纳米线投影面积占膜层总面积的比例。由前文式(10)可知,  $\sigma_{ext}$  与  $C_{ext}$  直接相关,而  $C_{ext}$  才是真正的消光截面。 $C_{ext}$  则取决于材料的几何尺寸,晶体点阵类型等。根据米氏色散理论<sup>[33]</sup>,  $C_{ext}$  随着 D 的减小而减小(如图 8(a)所示)。这说明在

直径足够小的时候,由于散射作用,AgNW 实际覆 盖面积将更小,因此在确保一定透光率下,增大A。 可降低 AgNW 网格的 R<sub>s</sub>。



图 8 不同直径(D)银纳米线透明电极透光率(T)、雾度(H)的相互关系

Fig.8 Relationship between diameter (D), transmission (T) and haze (H) of AgNW: (a). T vs  $A_c$ ; (b). H vs  $A_c$ ; (c). model plot (line) and experimental data (point) of  $H/A_c$  vs D

散射可以增加透光率,但是也会引起电极表面的雾度<sup>[34]</sup>。雾度是指透明材料表面因为光的漫反射引起的模糊不清的现象,其定义为<sup>[35]</sup>:

$$H = (I_{\rm s})_{2.5^{\circ}-90^{\circ}} / [I_{\rm d} + (I_{\rm s})_{\rm f}]$$
(12)

其中(Is)2.5°-90°为光透过材料后与入射光夹角在 2.5° 到 90°之间的光强度, Id 为光透过材料后平行于入射 光的光强度, (I<sub>s</sub>)<sub>f</sub> 为光透过材料后所有不平行于入 射光线的光强度。雾度大致可以认为是散射光占透 射光的比例,其值可以通过雾度计或带积分球的紫 外可见分光光度计测出。影响雾度的主要参数是覆 盖率 $A_c$ 和银线直径 $D_o$ 在相同的 $A_c$ 下,直径为56 nm 的银线网络显然比直径为 100 nm 和 153 nm 的网络 具有更低的雾度(如图 8(b)所示)。准确计算雾度的 方法非常复杂, Khanarian 等<sup>[36]</sup>通过建模给出了 $H/A_c$ 随 D 的变化趋势(如图 8(c)中曲线所示),此图不仅 反映了H随D的总体变化趋势,也说明了减小雾度 的根本途径是减小 D。由图 7 可知即使是 L/D 超过 800 的纳米线网络, 若使方阻在数十欧姆以下 Ac 必 然超过 0.1。在这样的 Ac下, 若 AgNW 网络由平均 直径为56nm(文献中常见尺寸)的银线构成,其雾度 约为 3%, 明显高于触摸屏 1%的要求; 若使雾度 <1%,则Ac必须在0.05以下,而这样低的覆盖率对 应的方阻已大于 100 Ω/□。因此要真正应用在触摸 屏和太阳能电池中,必须进一步降低 AgNW 的直 径。根据图 8(c)的曲线估算,当 D=25 nm 时, H/A。 ≈10%, 即当 Ac=0.1 时, H=1%, 大致满足要求(若 长径比仍按照 800 计算,此时线长 L≈20 μm, R<sub>s</sub>≈20 Ω/□)。但是目前 20 µm/25 nm 的银纳米线合成在文 献中仍然鲜有报道<sup>[23, 37]</sup>。

雾度理论在有效电阻理论基础上进一步考虑了 散射对透明导电膜层光学性能的影响。雾度指标的 提出对银纳米线的尺寸提出了更高的要求,在不考 虑直径的情况下单纯提高长径比难以满足触摸屏类 显示器件的性能要求。综合雾度理论和有效电阻理 论得出的 20 μm/25 nm 的结论已成为银纳米线导电 网络综合性能达到 ITO 导电玻璃水平的尺寸要求。

## 5 结语

银纳米线的问世至今已有十余年,在此过程中 制备出的各种尺寸的银纳米线层出不穷。随着研究 的深入,研究者相继提出了银纳米线透明电极的相 关理论,旨在指导高性能透明电极的制备及银纳米 线的合成。早期的光电优值理论从唯像角度出发, 提出了光电优值,该值是透明电极综合光电性能的 重要参数。随后的随机网络理论以更直观的物理模 型揭示了银线的长度和方阻、覆盖率和透光率之间 半定量的关系。有效电阻理论通过引入有效电阻将 透明电极的综合光电性能直接与长径比相联系。最 新的雾度理论对透明电极提出了更全面的要求。上 述理论建立了透明电极光电综合性能和银纳米线尺 寸参数之间的对应关系,对银纳米线的合成提供了 尺寸要求,有很强的指导意义。虽然超细银纳米线 的合成仍然是制约其透明电极应用的瓶颈,但直径 稍大的高长径比银纳米线在太阳能电池阳极以及大 尺寸显示器件上仍有用武之地。相信随着银纳米线 合成和透明电极制备工艺的逐渐成熟,其取代 ITO 成为新一代主流透明电极材料只是时间问题。

# 参考文献:

- ELLMER K. Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes[J]. Nature photonics, 2012, 6(12): 809-817.
- [2] IIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991, 354(6348): 56-58.
- [3] DOHERTY E M, DE S, LYONS P E, et al. The spatial uniformity and electromechanical stability of transparent, conductive films of single walled nanotubes[J]. Carbon, 2009, 47(7): 2466-2473.
- [4] NIRMALRAJ P N, LYONS P E, DE S, et al. Electrical connectivity in single-walled carbon nanotube networks
   [J]. Nano letters, 2009, 9(11): 3890-3895.
- [5] KIM U, KANG J, LEE C, et al. A transparent and stretchable graphene-based actuator for tactile display[J]. Nanotech- nology, 2013, 24(14): 1846-1854.
- [6] KIM T, CANLIER A, KIM G H, et al. Electrostatic spray deposition of highly transparent silver nanowire electrode on flexible substrate[J]. ACS Appl mater interfaces, 2013, 5(3): 788-794.
- [7] HAUGER T C, AL-RAFIA S M I, BURIAK J M. Rolling silver nanowire electrodes: simultaneously addressing adhesion, roughness, and conductivity[J]. ACS Appl mater interfaces, 2013, 5(23): 12663-12671.
- [8] LEE P, LEE J, LEE H, et al. Highly stretchable and highly conductive metal electrode by very long metal nanowire percolation network[J]. Advanced materials, 2012, 24(25): 3326-3332.
- [9] TOKUNO T, NOGI M, KARAKAWA M, et al. Fabrication of silver nanowire transparent electrodes at room temperature[J]. Nano research, 2011, 4(12): 1215-1222.
- [10] MADARIA A R, KUMAR A, ISHIKAWA F N, et al. Uniform, highly conductive, and patterned transparent films of a percolating silver nanowire network on rigid and flexible substrates using a dry transfer technique[J]. Nano research, 2010, 3(8): 564-573.
- [11] HU L, WU H, CUI Y. Metal nanogrids, nanowires, and nanofibers for transparent electrodes[J]. Mrs bulletin, 2011, 36(10): 760-765.

- [12] LEE S J, KIM Y H, KIM J K, et al. A roll-to-roll welding process for planarized silver nanowire electrodes[J]. Nanoscale, 2014, 6(20): 11828-11834.
- [13] CUI Z, POBLETE F R, CHENG G, et al. Design and operation of silver nanowire based flexible and stretchable touch sensors[J]. Journal of materials research, 2015, 30(1): 1-7.
- [14] MADARIA A R, KUMAR A, ZHOU C. Large scale, highly conductive and patterned transparent films of silver nanowires on arbitrary substrates and their application in touch screens[J]. Nanotechnology, 2011, 22(24): 245201.
- [15] SONG M, YOU D S, LIM K, et al. Highly efficient and bendable organic solar cells with solution-processed silver nanowire electrodes[J]. Advanced functional materials, 2013, 23(34): 4177-4184.
- [16] NOH Y J, KIM S S, KIM T W, et al. Cost-effective ITO-free organic solar cells with silver nanowire–PEDOT: PSS composite electrodes via a one-step spray deposition method[J]. Solar energy materials & solar cells, 2014, 120(1): 226-230.
- [17] HARDIN B E, GAYNOR W, DING I K, et al. Laminating solution-processed silver nanowire mesh electrodes onto solid-state dye-sensitized solar cells[J]. Organic electronics, 2011, 12(6): 875-879.
- [18] SAHIN C, ELIF S A, HUSNU E U. Optimization of silver nanowire networks for polymer light emitting diode electrodes.[J]. Journal of the acoustical society of America, 1998, 103(5): 2999.
- [19] YU Z, ZHANG Q, LI L, et al. Highly flexible silver nanowire electrodes for shape-memory polymer light-emitting diodes[J]. Advanced materials, 2011, 23(5): 664-668.
- [20] LI L, YU Z B, HU W, et al. Efficient flexible phosphorescent polymer light-emitting diodes based on silver nanowire-polymer composite electrode[J]. Advanced materials, 2011, 23(46): 5563-5567.
- [21] LANGLEY D, GIUSTI G, MAYOUSSE C, et al. Flexible transparent conductive materials based on silver nanowire networks: A02 review[J]. Nanotechnology, 2013, 24(45): 480-487.
- [22] JIN H L, LEE P, LEE D, et al. Large-scale synthesis and characterization of very long silver nanowires via successive multistep growth[J]. Crystal growth & design, 2012, 12(11): 5598-5605.

- [23] LEE E J, CHANG M H, KIM Y S, et al. High-pressure polyol synthesis of ultrathin silver nanowires: Electrical and optical properties[J]. Apl materials, 2013, 1(4): 2010.
- [24] SOREL S, LYONS P E, SUKANTA D, et al. The dependence of the optoelectrical properties of silver nanowire networks on nanowire length and diameter[J]. Nanotechnology, 2012, 23(18): 185201.
- [25] SUKANTA D, KING P J, LYONS P E, et al. Size effects and the problem with percolation in nanostructured transparent conductors.[J]. Acs nano, 2010, 4(12): 7064-72.
- [26] PIKE G E, SEAGER C H. Percolation and conductivity: A computer study I.[J]. Physical review B, 1974, 10(4): 1421.
- [27] HU L, HECHT D S, GRUNER G. Carbon nanotube thin films: fabrication, properties, and applications[J]. Chemical reviews, 2010, 110(10): 5790-5844.
- [28] DINGLE R B. The electrical conductivity of thin wires[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A. Mathematical and physical sciences, 1950, 201(1067): 545-560.
- [29] BERGIN S M, CHEN Y H, WILEY B J, et al. The effect of nanowire length and diameter on the properties of transparent, conducting nanowire films[J]. Nanoscale, 2012, 4(6): 1996-2004.
- [30] HU L B, KIM H S, CUI Y, et al. Scalable coating and

properties of transparent, flexible, silver nanowire electrodes[J]. ACS Nano, 2010, 4(5): 2955-2963.

- [31] JIU J, WANG J, SUGAHARA T, et al. The effect of light and humidity on the stability of silver nanowire transparent electrodes[J]. RSC Advanced, 2015, 5: 27657-27664.
- [32] 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.
- [33] HULST H C, VAN DE HULST H C. Light scattering by small particles[M]. NY: Courier Corporation, 1957.
- [34] PRESTON C, XU Y L, HU L B. Optical haze of transparent and conductive silver nanowire films[J]. Nano research. 2013, 6(7): 461-468.
- [35] WANG L, KAMAL M R, REY A D. Light transmission and haze of polyethylene blown thin films[J]. Polymer engineering & science, 2001, 41(2): 358-372.
- [36] KHANARIAN G, JOO J, LIU X Q, et al. The optical and electrical properties of silver nanowire mesh films[J]. Journal of applied physics, 2013, 114(2): 024302.
- [37] RAN Y X, HE W W, WANG K, et al. A one-step route to Ag nanowires with a diameter below 40 nm and an aspect ratio above 1000[J]. Chemical communications, 2014, 50(94): 14877.

#### 

#### 【上接第 55 页】

- [9] 陈德文, 汪欢晃, 刘康伟, 等. 电感耦合等离子体原子 发射光谱法同时测定金属饰品中铅、镉、铬、汞、锑、 砷、硒、钡、镍含量[J]. 化学试剂, 2011(10): 916-918.
  CHEN D W, WANG H H, LIU K W, et al. Simultaneous determination of Pb, Cd, Cr, Hg, Sb, As, Se, Ba and Ni by ICP-AES in metal jewelry[J]. Chemical reagents, 2011(10): 916-918.
- [10] 伏荣进,曲蔚,华毅超,等. ICP-AES 法测定金箔的含金量[J]. 中国测试技术,2007,33(3):70-72.
  FU R J, QU W, HUA Y C, et al. Determination of gold content in gold foil by ICP-AES[J]. China measurement technology, 2007, 33(3):70-72.
- [11] 何桂华, 陈晞, 孙志成, 等.应用多元统计技术研究动

物体内重金属累积富集及代谢规律[J].现代科学仪器, 2011(3): 92-94.

HE G H, CHEN X, SUN Z C, et al. Research on cumulation and enrichment of heavy metal in animal by multivariate statistical technique[J]. Modern scientific instruments, 2011(3):92-94.

[12] 李桂华,张凤霞,刘化峰,等. ICP-AES 法检验含金基 体多元素混合标准溶液的均匀性[J].贵金属,2015, 36(3): 55-59.

LI G H, ZHANG F X, LIU H F, et al. Homogeneity tests on the gold matrix multi-element mixed standard solution by ICP-AES[J]. Precious metals, 2015, 36(3): 55-59.