

doi:10.3788/gzxb20184705.0516003

# 柔性 SrTiO<sub>3</sub>/Ag/SrTiO<sub>3</sub> 复合结构透明导电薄膜的制备和性能研究

董清臣<sup>1</sup>, 葛磊蛟<sup>2</sup>, 孙永涛<sup>3</sup>, 于仕辉<sup>4</sup>

(1 平顶山工业职业技术学院 自动化与信息工程学院, 河南 平顶山 467000)

(2 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

(3 天津大学 力学系 天津市非线性动力学与控制重点实验室, 天津 300350)

(4 天津大学 微电子学院, 天津 300072)

**摘 要:**为获得高性能的柔性透明导电薄膜, 采用磁控溅射技术在柔性 PC 衬底上制备出了 STO (30 nm)/Ag/STO (30 nm) 复合结构透明导电薄膜. 分别对不同中间 Ag 层厚度薄膜的结构、光学和电学性质进行了研究. 研究发现: 随着中间 Ag 层厚度的增加, 可见光区的平均透率先增大后减小, 电阻率和方块电阻持续减小; 当中间 Ag 层厚度为 11 nm 时, 复合结构透明导电薄膜具有最佳的品质因子为  $14.23 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ , 此时, 其可见光区平均透过率为 82%, 方块电阻为 9.2  $\Omega/\text{sq.}$ .

**关键词:** 薄膜; 光学材料; 磁控溅射沉积; 透明导电薄膜; 柔性

中图分类号: TN305.05

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)05-0516003-6

## Preparation and Investigation of Flexible SrTiO<sub>3</sub>/Ag/SrTiO<sub>3</sub> Multilayer Transparent Conductive Thin Films

DONG Qing-chen<sup>1</sup>, GE Lei-jiao<sup>2</sup>, SUN Yong-tao<sup>3</sup>, YU Shi-hui<sup>4</sup>

(1 School of Automation and Information Engineering, Pingdingshan Industrial College of Technology, Pingdingshan, Henan 467000, China)

(2 School of Electrical Information and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(3 Department of Mechanics, Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Control, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

(4 School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** In order to obtain high-performance flexible transparent conductive thin films, STO (30 nm)/Ag/STO (30 nm) multilayer thin films were prepared on PC substrates by magnetron sputtering. The influences of Ag mid-layer thickness on the structure, optical and electrical properties of the multilayer thin films were investigated. As the thickness of Ag mid-layer increases, the average transmittance in visible region firstly increases and then decreases, both the resistivity and sheet resistance decrease. For the multilayer thin films with 11 nm thick Ag mid-layer, it exhibits the maximum figure of merit of  $14.23 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$  with sheet resistance of 9.2  $\Omega/\text{sq.}$ , and the average transmittance is  $\sim 82\%$  in the visible light region.

**Key words:** Thin films; Optical materials; Magnetron sputtering deposition; Transparent conductive films; Flexible

**OCIS Codes:** 160.4760; 310.4165; 310.7005

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61701338, 11502162)资助

第一作者: 董清臣(1968—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为电子信息和自动化. Email: dongqingchen1968@163.com

通讯作者: 孙永涛(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为功能材料和力学性质. Email: sunyongtao100@163.com

收稿日期: 2017-12-25; 录用日期: 2018-02-01

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

透明导电氧化物(Transparent Conductive Oxide, TCO)薄膜作为透明电极被广泛应用在诸多光电器件中<sup>[1-4]</sup>.其中,Sn<sup>4+</sup>掺杂的In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ITO)薄膜因具有低的电阻率和高可见光透过率等优良的光电性能,是目前最常用的透明电极材料<sup>[5-7]</sup>.但是ITO中含有稀有金属铟,其资源极为匮乏、价格昂贵且具有一定的毒性,需要开发出一种新的透明导电薄膜来替代ITO<sup>[8]</sup>.一些研究者对ZnO基及SnO<sub>2</sub>基透明导电薄膜开展了大量研究<sup>[9-11]</sup>,但是这些透明导电薄膜的电阻率仍然不够低,不能满足需要.特别是随着柔性电子学的发展,对柔性透明导电薄膜的需求极为迫切,而在柔性基底上制备的ITO、ZnO基和SnO<sub>2</sub>基的透明导电薄膜的电阻率普遍在10<sup>-3</sup> Ω·cm以上,远远不能满足应用要求<sup>[12]</sup>.亟需采用新的材料和制备方法去制备柔性透明导电薄膜.

最近一些研究者设计出了TCO/金属/TCO三明治结构的透明导电薄膜<sup>[13-17]</sup>,这种结构的透明导电薄膜具有很低的电阻率和方块电阻,在可见光区也具有较高的透过率.而对于SrTiO<sub>3</sub>/金属/SrTiO<sub>3</sub>结构的透明导电薄膜却鲜有报道.SrTiO<sub>3</sub>(STO)是一种具有钙钛矿结构的宽带隙(~3.7 eV)半导体材料,化学稳定性和热稳定性好,在电化学、电阻开关、半导体晶体管方面有着重要的应用<sup>[18-19]</sup>.并且STO中不含有稀有元素,价格便宜,易于制备.此外,在常被用来作为中间金属层的材料中,金属Ag相对于Au具有低的电阻率和成本,相对于Cu具有更好的化学稳定性,是作为金属层的最佳选择<sup>[20]</sup>.本文采用磁控溅射方法在柔性聚碳酸酯(PC)衬底上成功制备出了STO/Ag/STO复合结构透明导电薄膜,研究了Ag层厚度对薄膜结构、表面形貌、光学和电学性能的影响,以及微观结构与光学、电学性能之间的内在关系.

## 1 实验过程

镀膜前,首先将20 mm×20 mm的正方形PC衬底在丙酮中超声清洗30 min,用去离子水反复冲洗后,用氮气吹干,放入磁控溅射真空室的载物台上.靶材分别采用STO陶瓷靶(纯度99.99%)和金属Ag靶(纯度99.99%).固定靶和衬底的距离为12 cm,衬底温度为室温.将磁控溅射的本底真空抽至3.0×10<sup>-4</sup> Pa,然后通入氩气和氧气,氩氧比为15:1,溅射气压为1.0 Pa,对STO靶材进行溅射镀膜,溅射功率为100 W,底层STO的厚度被控制在30 nm.溅射结束后,将真空度再次抽至3.0×10<sup>-4</sup> Pa,然后通入1 Pa的纯氩气,在50 W的功率下对Ag层进行溅射,沉积厚度分别控制在0、5、8、11、14和17 nm.当Ag层沉积结束后,再次利用和底层STO同样的工艺制备顶层STO薄膜.

实验采用Rigaku D/MAX-RB型X射线衍射仪测量薄膜的结晶和取向;采用Cu Kα X射线源(λ=0.154 2 nm);场发射扫描电镜(FE-SEM)图片通过美国FEI公司的Nanosem 430扫描电镜采集;为了保证薄膜厚度的一致性,厚度通过Alpha-StepD-100台阶仪测试得到.电学性质用Ecopia HMS3000型霍尔效应测试仪和SX1934型四探针进行测量;光学性质用Varian Cary 5000型紫外-可见-近红外光谱仪进行了测量,测量范围为320~850 nm.

## 2 结果分析与讨论

图1是不同中间Ag层厚度的STO/Ag/STO复合结构透明导电薄膜的XRD图.由于STO薄膜的结晶温度在500℃以上<sup>[21]</sup>,在所有的样品中,STO薄膜都是非晶结构,在XRD图中没有观察到STO的衍射峰.当中间Ag层厚度在8 nm以下时,没有Ag的衍射峰出现,这是由于Ag层太薄,XRD的检测精度不足,难以检测到.当中间Ag层厚度大于8 nm时,(1 1 1)衍射峰出现,且随着中间Ag层厚度的增加,衍射峰强度逐渐增强.

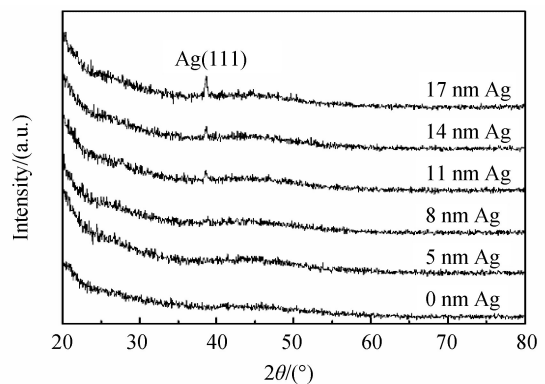


图1 不同中间Ag层厚度的STO/Ag/STO复合结构透明导电薄膜的XRD图

Fig.1 XRD patterns of STO/Ag/STO multilayer transparent conductive thin films with various Ag mid-layer thicknesses

图 2 是不同中间 Ag 层厚度的 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的 SEM 表面形貌图.随着中间 Ag 层厚度的变化,薄膜的表面形貌也明显变化,这说明表面形貌主要受中间 Ag 影响<sup>[22]</sup>.如图 2(a)~(b),当中间 Ag 层厚度在 8 nm 以下时,薄膜的表面形貌非常粗糙不平整,这是由于中间 Ag 层处于一种岛状结构.如图 2(c),当中间 Ag 层厚度为 11 nm 时,薄膜表面变得平整,表明表面出现了一些微小的孔洞.这是由于随着厚度的增加,中间 Ag 层由岛状结构逐渐变成一种准连续或者连续的网状结构,导致薄膜表面出现一些孔洞.如图 2(d)~(e),随着 Ag 层厚度的继续增加,薄膜的表面变得光滑,这是由于中间 Ag 层由网状结构变成一层完整连续的薄膜.

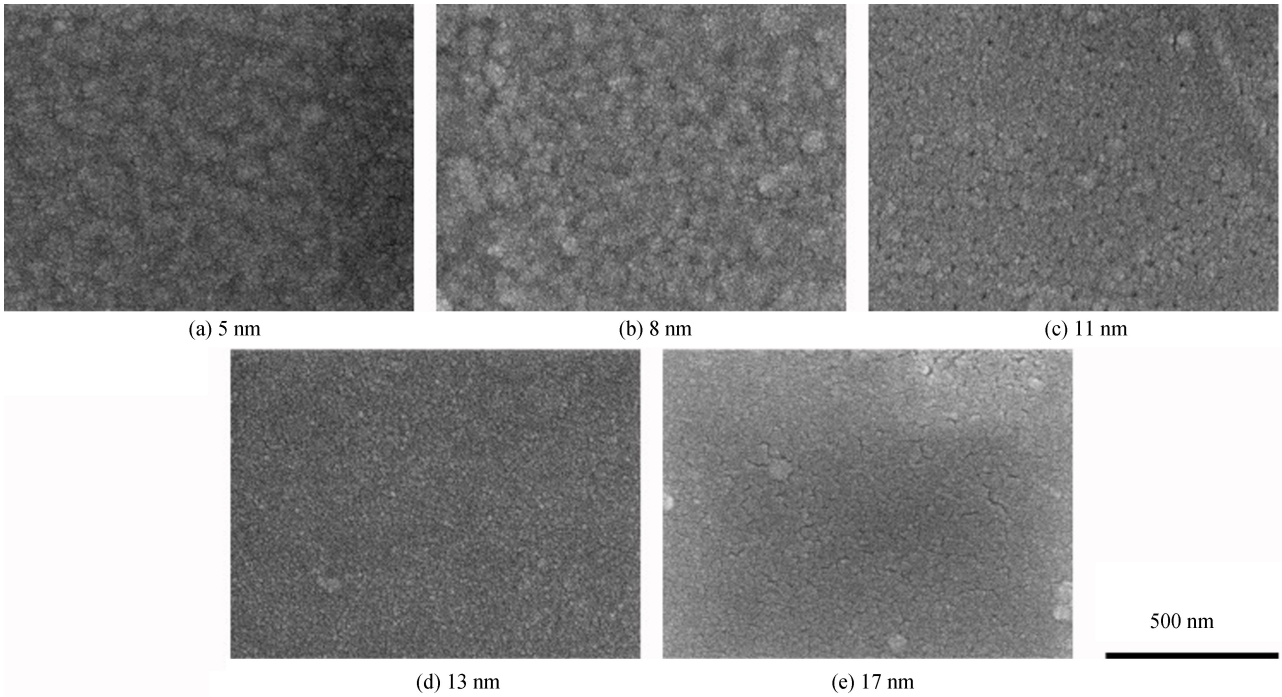


图 2 不同中间 Ag 层厚度的 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的 SEM 表面形貌

Fig.2 SEM morphologies of STO/Ag/STO multilayer transparent conductive thin films with various Ag mid-layer thicknesses

图 3 是不同中间 Ag 层厚度的 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的紫外可见光谱(320~850 nm). STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜在可见光区(380~780 nm)的平均透过率( $T_{av}$ )的计算公式为<sup>[14]</sup>

$$T_{av} = \frac{\int V(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int V(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中, $T(\lambda)$ 是光学透过率, $V(\lambda)$ 是光的发光效率函数, $\lambda$ 从 380 nm 到 780 nm. $V(\lambda)$ 在波长为 555 nm 时为 1,在 380~780 nm 时介于 0 和 1 之间,在 380~780 nm 之外的值为零.通过式(1)计算可知,单纯 60 nm 厚 STO 薄膜在可见光区的平均透过率在 90%以上.当在中间插入 5 nm 厚 Ag 层时,形成 STO/Ag/STO 结构的透明导电薄膜,其在可见光区平均透过率直线下降至 78%.随着中间 Ag 层的厚度从 5 nm 增加到 11 nm,可见光区平均透过率缓慢增加到 82%,当中间 Ag 层厚度进一步增加到 17 nm 时,在可见光区平均透过率又迅速下降到 62%.对此光学现象可以做出以下解释:当中间 Ag 层厚度小于 8 nm 时,Ag 层呈现一种岛状不连续的结构,STO 薄膜和 Ag 之间存在大的接触面面积,在 STO/Ag 接触面处会产生大量的光学散射,因此在可见光区平均透过率较低.随着中间 Ag 层厚度从 5 nm 增加到 11 nm,Ag 层逐渐成为一种准连续或者连续的结构,STO 和 Ag 之间的接触面面积大大减小,对光的散射也相应减少,因此光学透过率轻微上升.但是,随着中间 Ag 层厚度的继续增加,Ag 层结构变得连续,其对光学的吸收和反射也大大增强,因此,在可见光区平均透过率迅速下降.

从图 3 中可以发现,当 Ag 层插入后,STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的光学透过率的变化趋势在长波长范围和短波长范围内是不一样的.在短波长范围内,透射率随着中间 Ag 层的厚度从 5 nm 增加到

11 nm 时,透射率增加,这是因为当中间 Ag 层厚度为 5 nm 时,Ag 层是不连续的岛状结构,这种结构会导致短波长光的散射更为严重.随着中间 Ag 层厚度的增加,Ag 层变为准连续或连续薄膜,由于载流子对光子的吸收,特别是由于  $d$ -带费米表面的电子激发<sup>[23-24]</sup>,导致短波长范围内的透射率增高.中间 Ag 层厚度继续增加时,在 Ag 层中存在更多的束缚电子,其将会捕捉光子形成激发态,并且中间 Ag 层也对光的反射大大加强,导致在短波长范围内的透过率下降.在长波长范围内,随着中间 Ag 层的增加,其透过率基本上是持续下降的,这主要是由于电子屏蔽效应和中间 Ag 层界面对光的反射和吸收所导致的<sup>[25]</sup>.

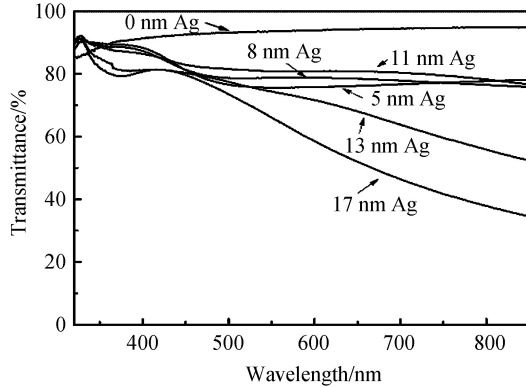


图 3 不同中间 Ag 层厚度的 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的紫外可见光谱

Fig.3 Ultraviolet-visible spectrums of STO/Ag/STO multilayer transparent conductive thin films with various Ag mid-layer thicknesses

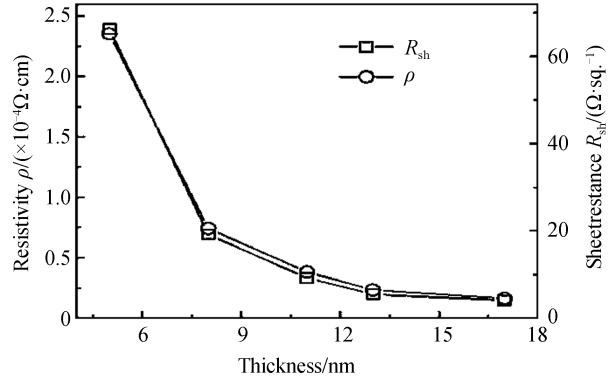


图 4 不同中间 Ag 层厚度的 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的电阻率和方块电阻

Fig.4 Resistivity and sheet resistance of STO/Ag/STO multilayer transparent conductive thin films with various Ag mid-layer thicknesses

图 4 是 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的电阻率和方块电阻随中间 Ag 层厚度的变化曲线.单纯 60 nm 厚 STO 薄膜在可测试的范围内不具有导电性.插入 5 nm 厚的 Ag 层形成 STO/Ag/STO 结构的薄膜之后,电阻率和方块电阻分别迅速下降到  $2.35 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  和  $66.3 \Omega/\text{sq.}$ .随着中间 Ag 层厚度增加到 17 nm,电阻率和方块电阻分别逐渐下降到  $1.62 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$  和  $4.1 \Omega/\text{sq.}$ .由于电阻率近乎等于方块电阻与薄膜厚度的乘积<sup>[26]</sup>,因此方块电阻随中间 Ag 层厚度的变化趋势和电阻率的基本一致.

电阻率主要是由薄膜内部的载流子迁移率和浓度决定的,其相应的关系式为

$$\rho = 1/ne\mu \quad (2)$$

式中, $\rho$  是电阻率, $n$  是载流子浓度, $e$  是载流子所带电荷, $\mu$  是电子迁移率.由式(2)可以看出,薄膜的电阻率与载流子浓度和迁移率成反相关.图 5 显示了 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的载流子浓度与迁移率随中间 Ag 层厚度的变化曲线.由图可知,STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的载流子浓度随着中间 Ag 层厚度的增加而增加,此现象可以用肖特基理论解释:金属 Ag 的功函数  $W_M \sim 4.3 \text{ eV}$ <sup>[27]</sup>,STO 的功函数  $W_S = 4.5 \text{ eV}$ <sup>[28]</sup>,Ag 和 STO 之间的接触是欧姆接触.由于 Ag 和 STO 之间的功函数相差较大,当他们相接触后,大量的电子从低功函数的 Ag 层注入高功函数的 STO 层内部,这些电子堆积在 STO 层中靠近接触面附近的一个非常狭窄的区域内,导致 STO 的导带和价带向下弯曲,直到达到一个热力学平衡,如图 6.STO 和 Ag 之间的势垒完全消失,费米能级直线穿过二者的交界面,此时,载流子在 Ag 和 STO 之间可以毫无障碍地自由流动.因此大量的载流子很容易从 Ag 流动到 STO 层,宏观表现为薄膜具有很低的电阻率和方块电阻.通过 Alford 课题组<sup>[25]</sup>的研究可知,载流子迁移率随着中间 Ag 层厚度的变化主要受界面散射影响.

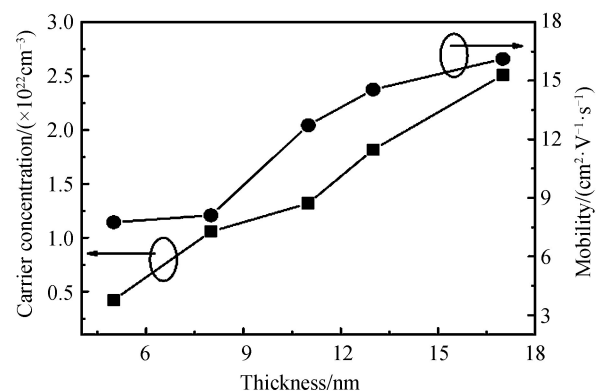


图 5 不同中间 Ag 层厚度的 STO/Ag/STO 复合结构透明导电薄膜的载流子浓度和迁移率

Fig.5 Carrier concentration and mobility of STO/Ag/STO multilayer transparent conductive thin films with various Ag mid-layer thicknesses

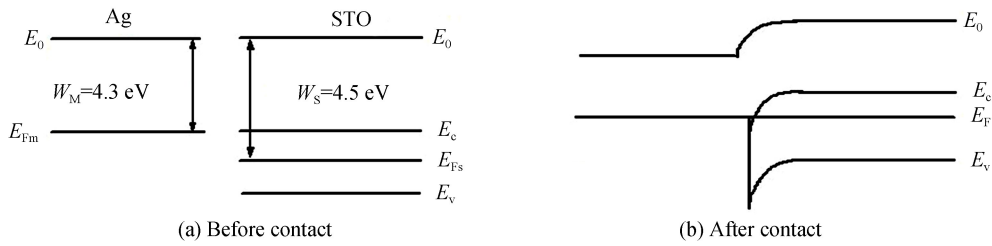


图6 Ag和STO的接触能带变化  
Fig.6 Schematic energy band diagrams of Ag and STO

由图5可以看出,随着中间Ag层厚度的增加,迁移率逐步增加.这是因为:当Ag层厚度为5 nm时,迁移率为  $7.75 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,此时界面散射(在STO/Ag和Ag/STO界面处的载流子散射)是影响迁移率的主要因素.随着中间Ag层厚度的增加,当中间Ag层厚度在11 nm时,Ag层变得准连续或者连续,界面面积逐渐变少,界面散射随之减少.因此,随着中间Ag层厚度的增加,STO/Ag/STO复合结构透明导电薄膜的迁移率逐渐增大.

通过图3和图4对STO/Ag/STO复合结构透明导电薄膜的光学和电学性能的研究发现,金属Ag层的厚度对其光学和电学性能起着决定性的作用.随着中间Ag层厚度的增加,STO/Ag/STO复合结构透明导电薄膜的导电性增强,然而其平均光学透过率却明显降低.光学性质和电学性质成一定的反相关关系,而对于透明导电薄膜而言,光学性质和电学性质同等重要.为了综合衡量透明导电薄膜的质量,定义了品质因子 $\varphi_{\text{TC}}$ ,可以表示为<sup>[29]</sup>

$$\varphi_{\text{TC}} = T_{\text{av}}^{10} / R_{\text{sh}} \quad (3)$$

式中, $T_{\text{av}}$ 是光学透过率(考虑到在透明显示器件中的应用,在此处使用380~780 nm之间的平均光学透过率), $R_{\text{sh}}$ 是方块电阻.品质因子被广泛用来评价不同透明导电薄膜的光电性能,其值越大,说明透明导电薄膜的综合性能越好.通过式(3)可以计算得出,插入5、8、11、13和17 nm厚的Ag层的STO/Ag结构透明导电薄膜的品质因子分别为  $1.31 \times 10^{-3}$ 、 $5.32 \times 10^{-3}$ 、 $14.23 \times 10^{-3}$ 、 $6.53 \times 10^{-3}$ 和  $1.95 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ .可以看出,当中间Ag层厚度为11 nm时,STO/Ag/STO复合结构透明导电薄膜具有最大的品质因子,即具有最佳的光电综合性能.

表1是STO/Ag(11 nm)/STO复合结构透明导电薄膜的柔性性能测试结果.由表可知,在曲率半径为10 mm时,该复合结构透明导电薄膜在反复弯曲50次后,其电阻率和方块电阻的变化率为~3%.由此可见,该柔性复合结构透明导电薄膜具有优异的柔性性能.

表1 不同弯曲次数下STO/Ag(11 nm)/STO复合结构透明导电薄膜的电学性能

Table 1 The dependence of electrical properties of STO/Ag(11 nm)/STO multilayer flexible thin films as a function of bend cycle

Bend-cycles	Resistivity/ $(\times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm})$	Sheet resistance/ $(\Omega \cdot \text{sq.}^{-1})$
0	3.82	9.20
5	3.91	9.42
10	3.93	9.46
30	3.97	9.49
50	3.98	9.50

### 3 结论

本文利用溅射技术在柔性PC衬底上制备出了STO(30 nm)/Ag/STO(30 nm)复合结构透明导电薄膜.对不同中间Ag层厚度薄膜的结构、表面形貌、光学和电学性质进行了研究和表征.随着中间Ag层厚度的增加,薄膜的表面形貌逐渐变得连续和光滑,可见光区的平均透率先增大后减小,电阻率和方块电阻持续减小,当中间Ag层厚度为11 nm时,复合结构透明导电薄膜具有最佳的品质因子为  $14.23 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ ,此时,其可见光区平均透过率为82%,方块电阻为  $9.2 \Omega/\text{sq.}$ .该柔性导电薄膜具有优异的光学和电学性能,有望在柔性电子学中得到应用.

#### 参考文献

[1] ZHANG K H, DU Y, PAPADOGIANNI A, *et al.* Perovskite Sr-doped LaCrO<sub>3</sub> as a new p-type transparent conducting

- oxide[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(35): 5191-5195.
- [2] TSAI M Y, BIERWAGEN O, SPECK J S, Epitaxial Sb-doped SnO<sub>2</sub> and Sn-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent conducting oxide contacts on GaN-based light emitting diodes[J]. *Thin Solid Films*, 2016, **605**: 186-192.
- [3] YU S, DING L, ZHENG H, *et al.* Electrical and photoelectric properties of transparent Li-doped ZnO/ZnO homojunctions by pulsed laser deposition[J]. *Thin Solid Films*, 2013, **540**: 146-149.
- [4] YU S, YANG W, LI L, *et al.* Improved chemical stability of ITO transparent anodes with a SnO<sub>2</sub> buffer layer for organic solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, **144**: 652-656.
- [5] OH M S, SEO I. Enhanced performance of GaN-based green light-emitting diodes with gallium-doped ZnO transparent conducting oxide[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(4): 1232-1236.
- [6] MINAMI T. Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes[J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**(17): 5822-5828.
- [7] RAOUFI D, KIASATPOUR A, FALLAH H R, *et al.* Surface characterization and microstructure of ITO thin films at different annealing temperatures[J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(23): 9085-9090.
- [8] YU S, LIU Y, ZHENG H, *et al.* Improved performance of transparent-conducting AZO/Cu/AZO multilayer thin films by inserting a metal Ti layer for flexible electronics[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(15): 3020-3023.
- [9] EBRAHIMIFARD R, GOLOBOSTANFARD M R, ABDIZADEH H. Sol-gel derived Al and Ga co-doped ZnO thin films: An optoelectronic study[J]. *Applied Surface Science*, 2014, **290**: 252-259.
- [10] WU M, YU S, CHEN G, *et al.* Structural, optical, and electrical properties of Mo-doped ZnO thin films prepared by magnetron sputtering[J]. *Applied Surface Science*, 2015, **324**: 791-796.
- [11] YU S, LI L, SUN Z, *et al.* Characteristics of transparent conducting w-doped SnO<sub>2</sub> thin films prepared by using the magnetron sputtering method[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, **98**(4): 1121-1127.
- [12] ELLMER K. Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(12): 809-817.
- [13] YU S, ZHANG W, LI L, *et al.* Optimization of SnO<sub>2</sub>/Ag/SnO<sub>2</sub> tri-layer films as transparent composite electrode with high figure of merit[J]. *Thin Solid Films*, 2014, **552**: 150-154.
- [14] SIVARAMAKRISHNAN K, ALFORD T L. Metallic conductivity and the role of copper in ZnO/Cu/ZnO thin films for flexible electronics[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(5): 052104.
- [15] YU S, LI L, XU D, *et al.* Characterization of SnO<sub>2</sub>/Cu/SnO<sub>2</sub> multilayers for high performance transparent conducting electrodes[J]. *Thin Solid Films*, 2014, **562**: 501-505.
- [16] LEE H M, LEE Y J, KIM I S, *et al.* Annealing effect of ZnO/Au/ZnO transparent conductive films[J]. *Vacuum*, 2012, **86**(10): 1494-1498.
- [17] PARK Y S, CHOI K H, KIM H K. Room temperature flexible and transparent ITO/Ag/ITO electrode grown on flexible PES substrate by continuous roll-to-roll sputtering for flexible organic photovoltaics[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, **42**(23): 235109.
- [18] KIM K W, LEE J S, NOH T W, *et al.* Metal-insulator transition in a disordered and correlated SrTi<sub>1-x</sub>Ru<sub>x</sub>O<sub>3</sub> system: Changes in transport properties, optical spectra, and electronic structure[J]. *Physical Review B*, 2005, **71**(12): 125104.
- [19] VAN BENTHEM K, ELSÄSSER C, FRENCH R H. Bulk electronic structure of SrTiO<sub>3</sub>: experiment and theory[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **90**(12): 6156-6164.
- [20] YU S, LI L, LYU X, *et al.* Preparation and investigation of nano-thick FTO/Ag/FTO multilayer transparent electrodes with high figure of merit[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20399
- [21] BAO D, YAO X, WAKIYA N, *et al.* Band-gap energies of sol-gel-derived SrTiO<sub>3</sub> thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **79**(23): 3767-3769.
- [22] YU S H, JIA C H, ZHENG H W, *et al.* High quality transparent conductive SnO<sub>2</sub>/Ag/SnO<sub>2</sub> tri-layer films deposited at room temperature by magnetron sputtering[J]. *Materials Letters*, 2012, **85**: 68-70.
- [23] DHAR A, ALFORD T L. Optimization of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Ag/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> multilayers as transparent composite electrode on flexible substrate with high figure of merit[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(10): 103113.
- [24] YU S, ZHANG W, LI L, *et al.* Optimization of SnO<sub>2</sub>/Ag/SnO<sub>2</sub> tri-layer films as transparent composite electrode with high figure of merit. *Thin Solid Films*, 2014, **552**: 150-154.
- [25] SIVARAMAKRISHNAN K, THEODORE N D, MOULDER J F, *et al.* The role of copper in ZnO/Cu/ZnO thin films for flexible electronics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(6): 063510.
- [26] YU S, ZHANG W, LI L, *et al.* Transparent conductive Sb-doped SnO<sub>2</sub>/Ag multilayer films fabricated by magnetron sputtering for flexible electronics[J]. *Acta Materialia*, 2013, **61**(14): 5429-5436.
- [27] BÜBMAN B K, MARINOV K, OCHEDOWSKI O, *et al.* Electronic characterization of single-layer MoS<sub>2</sub> sheets exfoliated on SrTiO<sub>3</sub>[J]. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 2012, **1474**: mrss12-1474-ccc05-29
- [28] MA S, XUE J, ZHOU Y, *et al.* Photochemical synthesis of ZnO/Ag<sub>2</sub>O heterostructures with enhanced ultraviolet and visible photocatalytic activity[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, **2**(20): 7272-7280.
- [29] WU M, YU S, HE L, *et al.* High quality transparent conductive Ag-based barium stannate multilayer flexible thin films[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 103.