

Influence of Different Buffer Layers on the Optoelectronic Properties of AZO Thin Films

Jia Chen, Linjun Li, Lijiang Zhang, Zhijie Shu, Cheng Chen, Hui Lu*

College of Science, East China University of Science and Technology, Shanghai
Email: chenjiawyyx@163.com, luhui@ecust.edu.cn

Received: May 13th, 2018; accepted: May 27th, 2018; published: Jun. 8th, 2018

Abstract

AZO films with TiO₂, SnO₂ and ZnO buffer layers were deposited on flexible PET substrates by intermediate frequency reaction magnetron sputtering method at room temperature. The effects of different buffer layers and Ar/O₂ gas ratio on the electrical and optical properties of AZO films were investigated by Hall effect and UV-Vis spectrophotometer analysis. The results indicated that all the buffer layers improve the electrical properties of the flexible AZO thin films. The AZO thin film with SnO₂ buffer layer deposited Ar/O₂ ratio of 5:1 exhibits a significant decrease in the resistivity and the average optical transmittance of more than 85% in the visible range.

Keywords

Magnetron Sputtering, AZO Thin Films, PET Substrate, Buffer Layer, Electrical and Optical Properties

不同缓冲层对柔性AZO薄膜光电性能的影响

陈 甲, 李林骏, 张力江, 束智杰, 陈 成, 陆 慧*

华东理工大学理学院, 上海
Email: chenjiawyyx@163.com, luhui@ecust.edu.cn

收稿日期: 2018年5月13日; 录用日期: 2018年5月27日; 发布日期: 2018年6月8日

摘 要

采用中频反应磁控溅射法在柔性PET衬底上分别添加TiO₂、SnO₂和ZnO等缓冲层, 室温沉积了掺杂铝的氧化锌薄膜(AZO)。通过对薄膜Hall性质分析以及紫外-可见光吸收特性分析, 研究了不同缓冲层以及反应溅射氩氧比对薄膜性能的影响, 获得优化的参数。研究表明, 添加缓冲层可以有效改善柔性AZO

*通讯作者。

薄膜的电学性质, 在SnO₂缓冲层上5:1氩氧比下生长的柔性AZO薄膜光电性能提高最为显著, 薄膜电阻率大幅降低, 可见光区域平均透过率超过85%。

关键词

磁控溅射, AZO薄膜, PET衬底, 缓冲层, 光电性质

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

透明导电氧化物(transparent conducting oxide——简称 TCO)薄膜主要包括 In、Sn、Zn 和 Cd 等的氧化物半导体薄膜及其掺杂体系, 因其同时具备高的直流导电性和优良的可见光透过性, 是信息产业中不可缺少的材料。在目前的 TCO 薄膜中, 以锡掺杂的氧化铟(ITO)薄膜和铝掺杂的氧化锌(AZO)薄膜最具代表性, 其中 ITO 薄膜以其高导电性成为广泛应用的透明电极材料。但是 ITO 薄膜需要高温生长, 限制了其在柔性显示器等领域的应用, 此外, 因其含有稀散贵金属铟, 故而成本较高。而氧化锌的性能独特, 无毒且化学稳定性高, 原料丰富、价格低廉, 近二十多年来赢得人们极大的关注。ZnO 掺 Al 薄膜(AZO)也被认为是一种最有希望替代 ITO 的材料[1] [2]。

随着硬质基底上沉积技术的成熟, 新型柔性半导体薄膜器件成为人们关注的焦点。在柔性基片(flexible substrate)上生长的 TCO 薄膜, 既保留了玻璃基片透明导电膜的光电特性, 同时具备可弯曲、不易破碎、重量轻、耐冲击、耐腐蚀、易于大面积生产和运输等独特的优点, 可广泛应用于制造柔性发光器件、可折叠液晶显示器、柔性衬底非晶硅太阳能电池, 以及“电子纸”等各种高效的便携式商务电子设备, 在各种柔性电子器件中有着更为广泛的产业化前景[3] [4] [5] [6] [7]。目前, 国内外研究者已经在 PET、TPT、PPR、PES、PC 等多种有机衬底上成功制备了柔性 ZnO 基 TCO 薄膜[8] [9] [10] [11] [12], 其中 PET(柔性聚乙烯对苯二甲酯)因其具有低化学活性和高光学透过率而成为最常用的柔性衬底材料之一。但是, 由于有机柔性衬底不耐高温, 在很大程度上限制了薄膜光电性能的优化及应用。因此, 除了发展柔性薄膜的低温制备技术外, 寻求合适的柔性衬底表面处理对改善薄膜结构、提高薄膜性能具有重要的意义[13] [14] [15]。

本文采用中频反应磁控溅射技术在柔性 PET 衬底上室温低功率沉积了 Al 掺杂 ZnO(AZO)薄膜, 通过在 PET 衬底上分别引入 TiO₂、SnO₂、ZnO 等氧化物半导体缓冲层, 有效提高了柔性 AZO 薄膜的光学、电学性能, 分析研究了氩氧流量比以及不同缓冲层对薄膜性能的影响效应。

2. 实验过程

本文采用 JCP-200 中频磁控溅射系统通过反应溅射法制备 AZO 薄膜, 靶材为掺 Al 重量比 2% 的纯 Zn 靶, 靶厚度为 4 mm, 直径为 50.5 mm。制备氧化物缓冲层的靶材分别为同样厚度和直径的纯度 99.99% 的 Ti 靶、Sn 靶、和 Zn 靶。柔性 PET 衬底依次经过丙酮、无水乙醇和去离子水超声清洗。实验中的本底压强为 10⁻⁴ Pa, 以高纯度的氩气和氧气分别作为溅射的工作气体和反应气体, 利用 I308-2B/ZM 型气体流量计可以分别精确控制氩气和氧气的流量, 溅射总压强保持在 0.2~0.5 Pa。溅射的靶材粒子与活化的氧反应, 在基板上沉积出氧化物薄膜。

薄膜沉积过程中调节控制的工艺参数主要有：衬底温度、氩氧流量比、溅射功率以及溅射时间等。以反应磁控溅射法在有机柔性 PET 衬底上沉积 AZO 薄膜时，提高基底温度或增加溅射功率均会导致柔性 PET 衬底因温度上升而发生弯曲变形，因此本文在室温和低溅射功率下进行 AZO 柔性薄膜的制备，通过改变氩氧流量比以获得不同性质的柔性 AZO 薄膜样品。所研究薄膜样品的制备条件如表 1 所示。实验时，先以同一制备条件在 PET 上沉积缓冲层，沉积时间 10 min；然后在缓冲层上制备 AZO 薄膜，膜厚采用 FTM106 型晶振仪进行监控和测量。

采用 Hall 8800 型霍尔效应测试仪测量薄膜的电学性质，包括电阻率、载流子浓度、迁移率等；薄膜的紫外 - 近红外吸收光谱由 UV-V2S-N2R 紫外可见分光光度计(CARY-500)测定。

3. 结果与讨论

3.1. AZO 薄膜电学性质随氩氧比的变化

通常认为降低氧分压，提高氩氧流量比，可增加氧空位缺陷提高载流子浓度，同时可避免掺杂铝的氧化，有助于降低 AZO 薄膜的电阻率[16]。然而在过高的氩氧流量比下，成膜空间活化的氧含量太低，无法生成具有一定化学计量比的 ZnO，则会导致薄膜的可见光透明性大幅降低。因此，为获得高质量透明导电 AZO 薄膜，我们在前期工艺参数筛选的基础上，选取工作气体 Ar 和反应气体 O₂ 的流量比为 4:1、5:1、6:1，在表 1 所示的制备条件下，在 PET 衬底以及 PET 添加缓冲层上制备了不同的柔性 AZO 薄膜。图 1(a)~(d)分别给出不同缓冲层上沉积的 AZO 薄膜的电阻率(resistivity)、载流子浓度(concentration)和迁移率(mobility)随氩氧流量比的变化曲线。

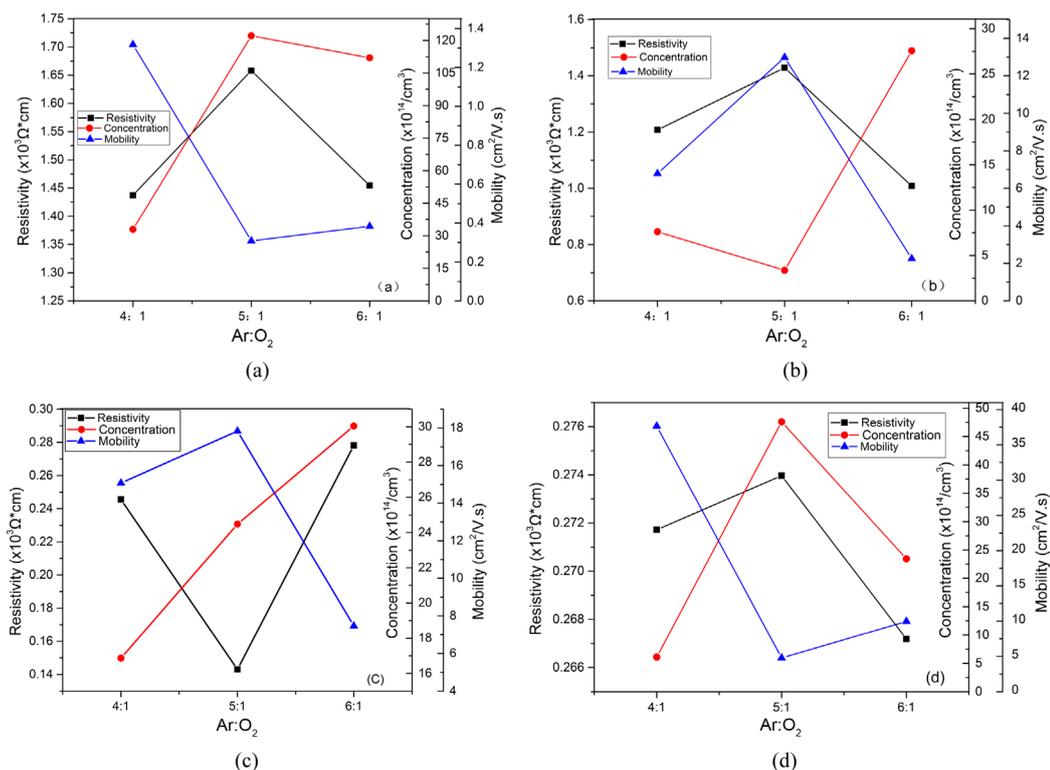


Figure 1. Electrical resistivity, carrier concentration and hall mobility of AZO thin films with different buffer layers as a function of Ar/O₂ ratio. (a) No buffer layer; (b) TiO₂ buffer layer; (c) SnO₂ buffer layer; (d) ZnO buffer layer

图 1. 不同缓冲层的 AZO 薄膜电学性质随氩氧比的变化。(a) 无缓冲层；(b) TiO₂ 缓冲层；(c) SnO₂ 缓冲层；(d) ZnO 缓冲层

Table 1. Preparation parameters of AZO thin films**表 1.** AZO 薄膜样品制备参数

衬底	本底压强(Pa)	溅射压强(Pa)	溅射功率(W)	Ar/O ₂ 流量比	基底温度(°C)	薄膜厚度(nm)
PET						
PET + TiO ₂	10 ⁻⁴	0.2~0.5	10	4:1~6:1	室温	400
PET + SnO ₂						
PET + ZnO						

薄膜电阻率与载流子浓度和迁移率的乘积成反比，可由下式(1)表示：

$$\rho = \frac{1}{n\mu q} \quad (1)$$

式中， ρ 为电阻率， n 为载流子浓度， μ 为迁移率， q 为载流子电量。薄膜表面电阻是由于载流子受到晶界、杂质及缺陷等的散射而产生，电阻率大小由载流子浓度和迁移率共同决定，与薄膜自身结构密切相关。本文在室温下生长的 AZO 薄膜晶粒细小，晶界众多，有着较强的晶界散射效应，迁移率的大小成为影响薄膜表面导电性质的主要因素。由图 1(a)、图 1(c)和图 1(d)可见，在 PET 衬底及 SnO₂、ZnO 缓冲层上沉积的 AZO 薄膜，其导电性能的高低主要取决于迁移率的增加或减小的幅度，既电阻率随迁移率增加而减小；但图 1(b)显示，在 TiO₂ 衬底上沉积的 AZO 薄膜，导电性能的高低主要取决于载流子浓度的变化幅度，既电阻率主要随载流子浓度增加而减小。我们认为，由于低温沉积 TiO₂ 缓冲层薄膜为锐钛矿结构，与 AZO 薄膜的晶格失配度较大，因此与其他几种薄膜相比，生成 AZO 薄膜的载流子浓度相对最小，其变化情况成为影响薄膜电阻率的主要因素。

由图 1(a)可见，在 PET 衬底上直接生长 AZO 薄膜时，氩氧比(Ar/O)从 4:1 增加到 5:1 时，随着氧分压的降低，氧空位缺陷增多，载流子浓度提高，但缺陷的增多也使载流子散射几率增大，载流子迁移率急剧减小，薄膜电阻率显著增大；当氩氧比进一步增加至 6:1 时，随着迁移率的提升，电阻率又重新降低，但是由于较高氩氧比下，Ar 离子浓度高，溅射速率过大，对 PET 衬底有损伤，其上沉积薄膜的结晶质量下降，迁移率没有明显提高，此时 AZO 薄膜的电阻率仍然要高于氩氧比为 4:1 时制备的薄膜。因此 PET 上沉积 AZO 薄膜时，提高氩氧比对降低薄膜电阻率并没有明显效果。

由于 ZnO 和 AZO 都是六角纤锌矿结构，二者间以及二者与 PET 衬底之间的界面结构及晶格相容性相似，因此，如图 1(d)所示，在 PET 衬底上引入 ZnO 缓冲后，所制备的 AZO 薄膜电学性质随氩氧比的变化规律与 PET 上直接沉积的 AZO 薄膜变化规律相似，但在氩氧比为 6:1 时，薄膜的电阻率却比 4:1 时大幅降低，显然，ZnO 缓冲层可有效改善溅射 Ar 离子浓度过高对 AZO 薄膜结晶质量的影响，从而提高薄膜的导电性能。

图 1(b)则表明，在 TiO₂ 缓冲层上沉积的 AZO 薄膜，随着氩氧比从 4:1 增加到 6:1，其载流子浓度先略有下降，随后急剧增大，而迁移率的变化则与之相反，薄膜电阻率随载流子浓度的增加而降低。同样在 TiO₂ 缓冲层上制备的 AZO 薄膜，在氩氧比提高至 6:1 时电阻率最低。

由图 1(c)可见，对于 SnO₂ 缓冲层上沉积的 AZO 薄膜，当氩氧比从 4:1 提高到 5:1 时，一方面，氧分压的降低，使薄膜中的氧空位缺陷增多，载流子浓度显著增加，并且此时的氧分压仍然可以保证从金属靶材溅射出来的大部分粒子获得较为充分的氧化，在 SnO₂ 缓冲层上生成的 AZO 结晶质量提高(后面光学性质的分析也证实了这一结论)，杂质离子散射效应减弱，载流子迁移率也有所增大，二者的综合效果最终使薄膜的电阻率显著降低；而当氩氧比进一步增加到 6:1 时，随着氧气含量不断降低，载流子浓度进一步增加，但缺陷的增加使载流子的散射几率增大，同时 Ar 离子浓度增加使溅射速率提高，也导致

ZnO 成核自由能降低, 晶粒密度增大, 晶界散射效应增强, 这些因素均导致载流子迁移率迅速下降, 薄膜电阻率也随之显著升高。因此, 氩氧比 5:1 为 SnO_2 缓冲层上沉积的 AZO 薄膜的优化条件。

3.2. 不同缓冲层对 AZO 薄膜电学性能的影响

图 2 给出了不同氩氧比条件下 AZO 薄膜电学性质随缓冲层的变化, (a)、(b)、(c) 分别为迁移率、载流子浓度以及薄膜电阻率的变化曲线。由图 2(a) 可见, 在三种氩氧比下, 不同缓冲层上沉积的 AZO 薄膜的载流子迁移率均高于 PET 上直接沉积的薄膜。可见, 缓冲层的介入可以有效缓解 AZO 薄膜与 PET 衬底间的晶格失配和热失配, 提高薄膜结晶质量, 减小了边界及杂质离子的散射效应, 提高了载流子迁移率。在 TiO_2 和 SnO_2 缓冲层上制备的 AZO 薄膜在氩氧比为 5:1 时具有相对最高的载流子迁移率, 但 ZnO 缓冲层上的薄膜则在 4:1 时迁移率最高, 在 5:1 时反而最低。

图 2(b) 则表明, 氩氧比为 4:1 时, 在 PET 以及不同缓冲层上制备的 AZO 薄膜的载流子浓度差别不大; 但随着氩氧比增加, 氧分压降低, 在 PET 上沉积 AZO 薄膜的氧空位缺陷增加, 载流子浓度明显提高, 而引入缓冲层后的 AZO 薄膜, 其载流子浓度随氩氧比的增加而小幅提高。

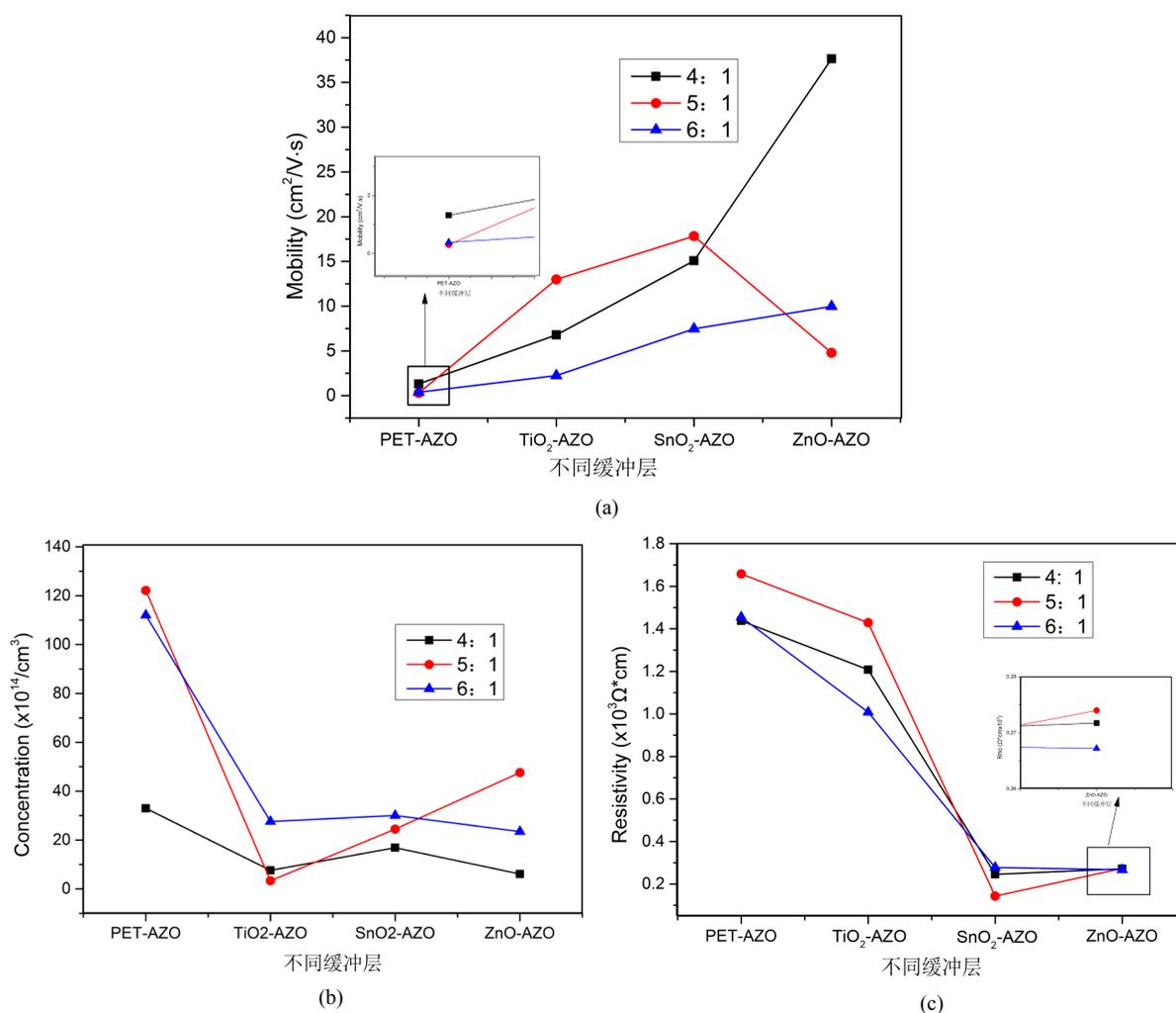


Figure 2. Hall mobility (a); Carrier concentration (b) and Electrical resistivity (c) of AZO thin films as a function of buffer layers

图 2. AZO 薄膜电学性质随缓冲层的变化(a) 迁移率; (b) 载流子浓度; (c) 电阻率

载流子浓度和迁移率共同决定了薄膜导电性能的高低。图 2(c)给出了三种氧氮比下 AZO 薄膜的电阻率随缓冲层的变化曲线,由图可见,三种氧氮比下添加缓冲层的 AZO 薄膜电阻率均低于没有缓冲层的薄膜,在 PET 衬底上引入缓冲层有效提高了柔性 AZO 薄膜的电学性质。并且,不同缓冲层对 AZO 薄膜电学性质的改善程度不同,如图 2(c)所示,SnO₂ 和 ZnO 缓冲层的改善效果显著,薄膜电阻率明显下降,并且制备时最优化的氧氮比分别为 5:1 和 6:1;而添加 TiO₂ 缓冲层的薄膜电阻率下降幅度较小。由于反应磁控溅射低温沉积的 TiO₂ 薄膜主要呈锐钛矿结构,与 SnO₂ 和 ZnO 相比,TiO₂ 缓冲层与 AZO 薄膜接触面晶格失配及热失配相对较大,在一定程度上会影响薄膜的结晶质量,使其对 AZO 薄膜电学性质的改善效果不如 SnO₂ 和 ZnO 缓冲层显著。

因此,选择 SnO₂ 和 ZnO 作为缓冲层,能有效改善 PET 上沉积柔性 AZO 薄膜的电学性质,其电阻率比没有缓冲层的薄膜降低了 80%以上;尤其在 SnO₂ 缓冲层上氧氮比为 5:1 时沉积的薄膜,电阻率可降低 90%以上。

3.3. 不同缓冲层对薄膜光学特性的影响

在上述优化条件下制备的不同 AZO 薄膜的透射光谱如图 3 所示。由图 3 可见,所有薄膜在紫外区域均有强烈吸收,带边陡峭,且添加缓冲层后 AZO 薄膜的紫外吸收边发生红移,意味着光学带隙减小,其中 ZnO 缓冲层红移程度相对最大。

而在可见光区域,PET 上直接生长的 AZO 薄膜的透过率为 80%,且各波段较为均匀;添加缓冲层后,薄膜在可见光区域的透过率有所波动,可能是由于 AZO 薄膜与缓冲层界面产生干涉而引起;在 SnO₂ 缓冲层上生长的 AZO 薄膜可见光区域的平均透射率超过 85%,大于 PET 上直接生长的薄膜,尤其在蓝绿光波段的透明性明显提高,透射率接近 90%。如前所述,SnO₂ 缓冲层使生成的 AZO 薄膜的结晶质量提高,对光的散射吸收减少,透射率增加。而添加 TiO₂ 缓冲层后的薄膜在蓝绿光波段的透射率下降,添加 ZnO 缓冲层的薄膜则在黄绿光波段的透射率略有下降,但两种薄膜在可见光区域的平均透射率仍在

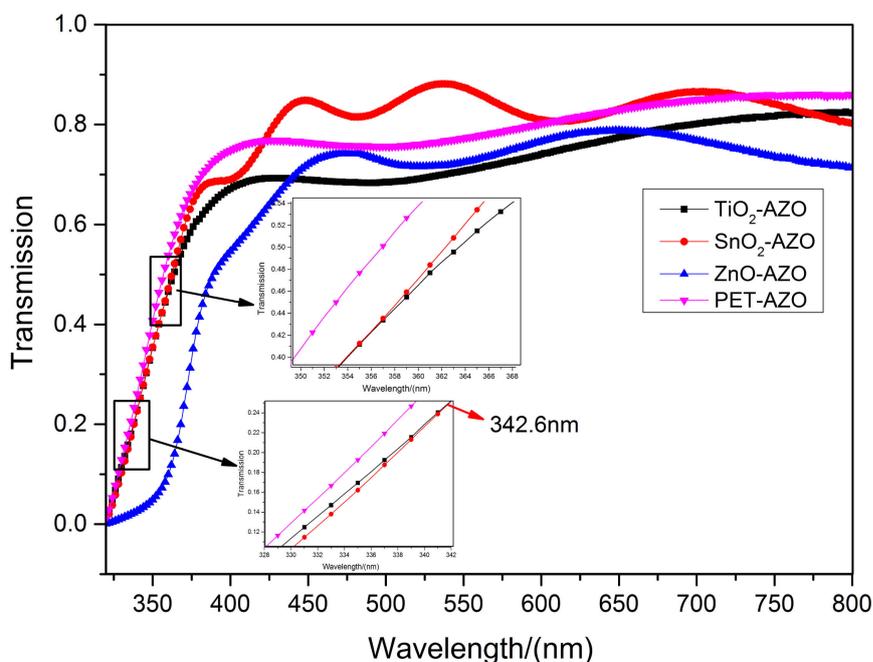


Figure 3. Transmittance spectra of AZO thin films with different buffer layer

图 3. 不同缓冲层上生长 AZO 薄膜的透射光谱

75%以上; 可见, TiO_2 和 ZnO 缓冲层对 AZO 薄膜的透过率没有明显影响, 而 SnO_2 缓冲层的引入可以提高薄膜的透过率, 改善薄膜的可见光透明性。

4. 结论

采用中频反应磁控溅射法在柔性 PET 衬底上室温沉积了掺杂铝的氧化锌薄膜(AZO)。研究了氩氧流量比对薄膜电学性质的影响, 获得优化的工艺条件。通过在 PET 上添加缓冲层, 可以缓解薄膜与衬底间的晶格失配和热失配, 有效改善柔性 AZO 薄膜的电学性质, 研究了 TiO_2 、 SnO_2 和 ZnO 等不同的缓冲层对薄膜光学电学性质的影响。其中 SnO_2 和 ZnO 缓冲层在反应溅射氩氧比分别为 5:1 和 6:1 时, 可以显著提高 AZO 薄膜的载流子迁移率, 薄膜电阻率分别降低了 90%和 80%。 TiO_2 和 ZnO 缓冲层对 AZO 薄膜的透明性没有明显影响, 可见光区域的平均透射率在 75%以上, 而 SnO_2 缓冲层的引入则增加了薄膜的可见光透明性, 使蓝绿光波段透射率接近 90%。综合光学电学性质的分析可以得出, 在 5:1 氩氧比下, 添加 SnO_2 缓冲层, 可以获得性能改善相对最佳的柔性 AZO 薄膜。

基金项目

2017 国家级大学生创新实践项目(201710251072)。

参考文献

- [1] Zhu, Y., Wang, Y., Wan, P.F., *et al.* (2012) Optical and Mechanical Properties of Transparent Conductive Al-Doped ZnO Films Deposited by the Sputtering Method. *Chinese Physics Letters*, **29**, Article ID: 038103, 1-4. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/29/3/038103>
- [2] Wang, X.J., Wang, H., Zhou, W.L., *et al.* (2011) Preparation and Character of Textured ZnO:Al Thin Films Deposited on Flexible Substrates by RF Magnetron Sputtering. *Materials Letters*, **65**, 2039. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.01.019>
- [3] Fortunato, E., Goncalves, A., Assuncao, V., *et al.* (2003) Growth of ZnO:Ga Thin Films at Room Temperature on Polymeric Substrates: Thickness Dependence. *Thin Solid Films*, **442**, 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00958-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00958-1)
- [4] 宋继中, 贺英, 朱棣, 等. 柔性光电器件发光层用 ZnO 微纳阵列/聚合物复合材料[J]. 物理化学学报, 2011, 27(5): 1207-1213.
- [5] Chung, Y.M., Moon, C.S., Jung, M.J., *et al.* (2005) The Low Temperature Synthesis of Al Doped ZnO Films on Glass and Polymer Using Magnetron Co-Sputtering: Working Pressure Effect. *Surface and Coatings Technology*, **200**, 936-939. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.197>
- [6] Hu, A.Z., Wu, F., Liu, J.P., *et al.* (2010) Density- and Adhesion-Controlled ZnO Nanorod Arrays on the ITO Flexible Substrates and Their Electrochromic Performance. *Journal of Alloys and Compounds*, **507**, 261-266. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.07.173>
- [7] Chen, Z., Li, S.J. and Zhang, W.F. (2013) Pulse Electrodeposition of ZnO/SnO₂ Composite Films: Growth Mechanism, Structural and Optical Studies. *Journal of Alloys and Compounds*, **557**, 274-278. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.177>
- [8] Lin, Y.C., Chen, M.Z., Kuo, C.C., *et al.* (2009) Electrical and Optical Properties of ZnO:Al Film Prepared on Polyethersulfone Substrate by RF Magnetron Sputtering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **337**, 52-56. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.11.049>
- [9] Hao, X.T., Ma, J., Zhang, D.H., *et al.* (2002) Thickness Dependence of Structural, Optical, Electrical Properties of ZnO:Al Films Prepared on Flexible Substrates. *Applied Surface Science*, **189**, 18-23. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(01\)90582-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(01)90582-3)
- [10] Guo, T.T., Dong, G.B., Gao, F.Y., *et al.* (2013) High Performance ZnO:Al Films Deposited on PET Substrates Using Facing Target Sputtering. *Applied Surface Science*, **282**, 467-471. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.155>
- [11] Wang, X.J., Wang, H., Zhou, W.L., *et al.* (2011) Preparation and Character of Textured ZnO:Al Thin Films Deposited on Flexible Substrates by RF Magnetron Sputtering. *Materials Letters*, **65**, 2039-2042. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.01.019>
- [12] Lee, J., Lee, Do., Lim, D., *et al.* (2007) Structural, Electrical and Optical Properties of ZnO:Al Films Deposited on

Flexible Organic Substrates for Solar Cell Applications. *Thin Solid Films*, **515**, 6094-6098.

<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.099>

- [13] Cao, W.T. and Du, W.M. (2007) Strong Exciton Emission from ZnO Microcrystal Formed by Continuous 532 nm Laser Irradiation. *Journal of Luminescence*, **124**, 260-264. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.03.011>
- [14] Hong, R.J., Wei, C.Y., He, H.B., *et al.* (2005) Influences of CO₂ Laser Irradiation on the Structure and Photoluminescence of Zinc Oxide Thin Films. *Thin Solid Films*, **485**, 262-266. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.03.012>
- [15] 赵艳, 蒋毅坚. ZnO 薄膜的激光辐照效应研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(4): 2679-2684.
- [16] Hong, R.J., Jiang, X., Szyszka, B., *et al.* (2003) Studies on ZnO:Al Thin Films Deposited by In-Line Reactive Mid-Frequency Magnetron Sputtering. *Applied Surface Science*, **207**, 341-350. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)01525-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01525-8)

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org