

# 透明导电氧化物薄膜及其制备方法

## Development of Fabrication Methods for Transparent Conductive Oxide Thin Films

王 华( 桂林电子工业学院 信息材料科学与工程系, 广西 桂林 541004)  
WANG Hua ( Department of Information Material Science and Engineering,  
Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

摘要: 综述了透明导电氧化物(TCO)薄膜的特性、应用及制备技术的发展,重点讨论了磁控溅射、脉冲激光沉积、溶胶-凝胶、喷射热分解等制备技术和柔性衬底 TCO 薄膜的制备状况、进展及发展趋势,并指出改进 TCO 薄膜制备技术的努力方向应体现完善薄膜性能、降低反应温度、提高控制精度、降低制备成本和适应集成化等趋势,而制备方法的选择则应根据薄膜的性能要求和不同的应用目的而不同。  
关键词: 透明导电氧化物; 光电特性; 制备工艺; 柔性衬底; 发展趋势  
中图分类号: TN248.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)09-0059-05

**Abstract:** The developments of transparent conductive oxide (TCO) methods are described. Topics focused are magnetron sputtering, pulsed laser deposition, sol-gel, spray pyrolysis and fabrication on flexible substrate. It is put forward that the fabrication methods for TCO thin films should be improved combined with high optical and electrical properties, low fabrication temperature, low cost and good adaptability for integrate circuit.  
**Key words:** TCO; optical and electrical properties; fabrication method; flexible substrate; development tendency

透明导电氧化物(Transparent Conductive Oxide, 简称 TCO)薄膜既是金属氧化物, 又是半导体薄膜材料, 也属于光学材料。透明导电薄膜的种类有很多, 但氧化物薄膜占主导地位。最早的透明导电氧化物薄膜——CdO 于 1907 年由 Badeker<sup>[1]</sup> 首次制成, 从此开始了透明导电薄膜的研究、开发与利用。透明导电氧化物薄膜一般为多晶膜, 主要包括 In, Sb, Zn 和 Cd 的氧化物及其复合多元氧化物薄膜材料。SnO<sub>2</sub> 基和 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基薄膜开始出现于 20 世纪 50 年代, 而 ZnO 基薄膜则兴起于 20 世纪 80 年代<sup>[2]</sup>。目前研究较多的是 Sn<sub>2</sub>O:F (FTO), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Sn (ITO) 和 ZnO: Al (ZAO)。透明导电氧化物薄膜具有禁带宽、电阻率低、可见光范围光透射率高和红外光谱区光反射率高等共同光电特性, 广泛地应用于平面显示器件、太阳能电池、反射热镜、气体敏感器件、特殊功能窗口涂层及其他光电子、微电子、真空电子器件领域。近年来还出现了由多种氧化物组成的新型多元化合物 TCO 薄膜以及具有 p 型导电特性的 TCO 薄膜, 使得 TCO 薄膜的研究和应用领域大大扩展。

### 1 透明导电薄膜的特性及应用

透明导电氧化物最重要的特性是导电性和对可见

光的透光性。这种材料一般为重掺杂、高简并半导体, 禁带宽度大于 3eV, 具有高载流子浓度 ( $10^{18} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ), 低电阻率 ( $10^{-3} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ), 高可见光透射率 (80% ~ 90%) 和高红外光反射率 (> 70%)。透明导电氧化物薄膜的导电性能主要是通过氧缺位和掺杂来提高, 其低电阻率特性由载流子浓度决定; 透明导电氧化物薄膜的禁带宽度大于可见光子能量 (3.1eV), 在可见光照射下不能引起本征激发, 从而对可见光透明, 其光学带隙与其载流子浓度密切相关。因此, 透明导电氧化物薄膜的光电性质依赖于金属的氧化状态、掺杂剂的特性与数量、制备方法与工艺控制等等。  
TCO 薄膜主要有 SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 ZnO 基三大体系, 其中以 Sn<sub>2</sub>O:F (FTO), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Sn (ITO) 和 ZnO: Al (ZAO) 最具代表性。近年来又发展了由三大基本体系材料组合而成的多元体系以及具有 p 型导电特性的 TCO 材料, 如: ZnO-SnO<sub>2</sub>, CdIn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, GaInO<sub>3</sub>, ZnO-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CdSb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, MgIn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, In<sub>4</sub>Sn<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, Zn<sub>2</sub>In<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等多元 TCO 薄膜<sup>[3]</sup> 和 CuAlO<sub>2</sub>, CuGaO<sub>2</sub> 等<sup>[4,5]</sup> p 型导电 TCO 薄膜。这些材料不但优化了原有材料的光电性能, 而且显示出某些特殊功能。因而大大提升了 TCO 薄膜的应用潜力并进一步扩展了其应用领域。

透明导电薄膜是平面显示器件的基础材料,主要用于液晶显示器。通常对液晶显示器的要求为  $100 \sim 500 \Omega/\text{sq}$ , 电阻率应低于  $2.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , 目前透明导电薄膜的电学性能完全能达到这个要求, 并且不污染液晶显示器。由于平板显示器的多样化, 如: 场致发光显示器、等离子显示、有机薄膜显示、电致荧光显示等等<sup>[6,7]</sup>, 在这些平板显示领域里, 低电阻率和高透射率的透明导电薄膜将会在底电极部件的制备中被大量采用。这些显示器对所采用的透明导电薄膜的导电率、方块电阻、可见光透过率、化学稳定性以及刻蚀性能等性能要求不一样。因此各种透明导电薄膜材料都将得到有效的利用。

在太阳能电池上, 透明导电膜作为减反射层和透明电极使用, 可以提高太阳能的转换效率, 如  $\text{ITO}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$  太阳能电池的转化效率可达  $13\% \sim 16\%$ <sup>[8]</sup>。利用透明导电膜在可见光区的高透射性和对红外光的高反射性, 制成寒冷环境下的视窗或太阳能收集器的观测窗, 使能量保持在一封闭的空间里以起到热屏蔽的作用, 可以大量节约能源, 是制造热镜的最佳材料之一。另外, 还可用作透明表面发热器, 在汽车、飞机等交通工具以及防雾摄影机镜头、特殊用途眼镜、仪器视窗上的防雾除霜玻璃<sup>[9]</sup>; 透明导电薄膜具有对微波的衰减性, 可用来屏蔽外界电磁波电子设备、计算机房、雷达屏蔽保护区等电子设备的干扰与破坏<sup>[10]</sup>; TCO 薄膜光电导随表面吸附的气体种类和浓度不同会发生很大变化, 据此特点, TCO 薄膜可用来制作表面型气敏器件, 通过掺入不同元素, 可检测不同的气体<sup>[11]</sup>; 柔性衬底透明导电薄膜的开发使其潜在用途扩大到制造柔性发光器件、可弯曲显示器、可折叠太阳能电池、不规则场所电磁屏蔽以及作为保温材料用于塑料大棚、玻璃粘贴膜等; p 型导电 TCO 材料的出现为实现由 TCO 材料构成的 p-n 结及透明半导体器件提供了可能性及潜在的应用价值。

## 2 透明导电氧化物薄膜的制备工艺

透明导电氧化物薄膜的制备方法很多, 发展也很快。像磁控溅射、脉冲激光沉积、溶胶-凝胶、热喷涂、化学气相沉积、反应热蒸发、原子层外延等薄膜制备的常见方法均被用于制备透明导电氧化物薄膜。透明导电氧化物薄膜的不同用途对薄膜的结晶取向、表面平整度、导电性、光学性能及气敏性等有不同的要求, 而薄膜的这些特性是由制备过程的工艺参数决定的。因此, 改进制备工艺的努力方向应体现完善薄膜性能、降低反应温度、提高控制精度、降低制备成本和适应集成

化等趋势, 而制备方法的选择则应根据薄膜的性能要求和不同的应用目的而不同。

### 2.1 磁控溅射法 TCO 薄膜的制备

磁控溅射技术是 20 世纪 70 年代开始用于实践, 特点是薄膜在低温下沉积获得优良的光学和电学性能。另外, 还具有沉积速率高、基片温度低、成膜黏附性好、易控制、成本低、能实现大面积制膜的优点, 与 IC 平面器件工艺有兼容性, 因而成为当今工业化生产中研究最多、最成熟、应用最广的一项成膜技术, 也是透明导电氧化物薄膜制备技术的研究热点。

透明导电薄膜的主要特性是透明和导电。影响这两个指标的因素很多, 如溅射电压、沉积速率、基片温度、溅射压力、氧分压以及靶材的组分比等等。磁控溅射技术制备透明导电薄膜要求尽可能低电压溅射, 因为磁控溅射等离子体中的负离子主要是氧离子, 被阴极(靶)电压加速并与加速电压成正比, 入射到基片表面能量很高, 可使透明导电薄膜因受离子轰击而损伤, 使薄膜电阻增大。

Wendt 和 Ellmer 等<sup>[12-14]</sup>研究了氧分压、溅射电压等工艺参数和离子能量对 ZAO 薄膜成膜质量的影响。他们发现氧分压的工艺窗口较窄, 是制备过程中较难控制的参数, 对薄膜的光电性能影响较大。Minami 等<sup>[15]</sup>发现, 采用射频磁控溅射技术制备的 ZAO 薄膜, 其在基片垂直方向上的薄膜电阻率要低于基片平行方向, 而且薄膜结晶性能与靶和基片的放置状况有密切的依赖关系。姜健等<sup>[16]</sup>采用磁控溅射方法制备 ZAO 薄膜的电阻率最小可达  $(2 \sim 5) \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , 可见光透射率大于  $85\%$ 。同时还发现, 基片温度影响着薄膜的厚度, 也影响着  $\text{ZnO}:\text{Al}$  的电学特性, 但随着基片温度的增加, 这种影响逐渐减弱, 在  $300^\circ\text{C}$  以下, 相对靶刻蚀处膜厚较小, 而在  $350^\circ\text{C}$  时基片上所形成的膜厚较为一致。尽管磁控溅射法在透明导电薄膜的制备中使用最为广泛, 然而溅射过程中产生的高能溅射粒子可能损坏基片和开始生成的薄膜, 对成膜质量有一定负面影响。

### 2.2 脉冲激光沉积工艺 TCO 薄膜的制备

脉冲激光沉积(PLD)工艺是在高真空系统中, 通过激光器发出脉冲激光汇聚在靶表面使其表面融化汽化沉积到基片上成膜。PLD 工艺沉积薄膜有很多优点: 工艺可重复性好; 化学计量比精确; 沉积速率可控, 操作简单, 特别是可避免沉积过程中对基片和已形成薄膜的损害; 其基片温度要求也不高, 而且薄膜成分与靶材保持一致。所以很多研究者采用 PLD 法来进行透明导电薄膜的沉积。在以往进行的透明导电薄膜的 PLD 沉积中, 所使用的激光器多种多样, 不仅有准分

子紫外激光,还有固体激光以及  $\text{CO}_2$  激光等<sup>[17-19]</sup>。波长为 248nm 的紫外准分子激光应用最为广泛。Adurodija F O 等<sup>[20]</sup>采用 PLD 工艺在室温下制备出电阻率为  $1.2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,可见光的透过率达 90% 的 ITO 薄膜。Kim H 等<sup>[21]</sup>则采用 PLD 方法在 200℃ 的玻璃衬底上获得了电阻率为  $3.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,透光率为 90% 的 AZO 薄膜。

根据使用靶材的不同,透明导电薄膜的 PLD 法可分为两类:一种是使用氧化物陶瓷靶材;另一种则是在氧气的反应气氛中利用多靶来沉积。如 AZO 薄膜的制备,一般采用掺杂有少量氧化铝(其掺杂比一般约为 1.5%)的氧化锌靶材。但是考虑到制备掺有氧化铝的氧化锌陶瓷靶材比较复杂,也可使用双靶(锌靶和铝靶)在反应性氧气气氛中进行 PLD 沉积的方法来制备 AZO 薄膜<sup>[22]</sup>,该方法是通过控制分别作用在铝靶和锌靶上的激光脉冲作用数来实现在氧化锌薄膜中一定比例的铝的掺杂。与使用掺铝氧化锌靶材进行 PLD 沉积的方法相比,该方法可非常方便地在实验中得到不同铝掺杂浓度的 AZO 透明导电薄膜。采用该方法在 K9 玻璃上制备的 AZO 薄膜在可见光区的透过率可达到 85% 左右。AZO 薄膜中的铝掺杂使得薄膜的禁带能量宽度增加,材料的吸收边向短波长的方向移动。值得注意的是,通过在 PLD 薄膜沉积过程中引入辅助放电可以提高薄膜铝掺杂的质量,但同时该手段不利于薄膜沉积速率的增加。采用 PLD 工艺虽然可以方便地通过调整脉冲频率与功率来控制薄膜的厚度,但不易获得大面积均匀薄膜,这也是该工艺大规模工业化制备透明导电薄膜的一个不利因素。

### 2.3 溶胶-凝胶工艺 TCO 薄膜的制备

溶胶-凝胶工艺是一种制备多元氧化物薄膜的常用方法。按工艺可分为旋涂法和浸涂法。浸涂法是将衬底插入含有金属离子的前体溶液中,以均匀速度将其提拉出来,在含有水分的空气中发生水解和聚合反应,最后通过热处理形成所需薄膜。而旋涂法则是通过将前体溶液滴在衬底后旋转衬底获得湿膜。溶胶-凝胶方法易于控制薄膜组分,可在分子水平控制掺杂,尤其适用于掺杂水平要求精确和多组元体系薄膜的制备。更重要的是该方法无需昂贵的真空设备,能在任意形状衬底上大面积均匀成膜,而且可以两面同时成膜。如果采用溶胶-凝胶工艺进行 TCO 薄膜的产业化生产,必将大大降低生产成本,利于实际应用。实践表明,采用该工艺在玻璃两面制成的 TCO 薄膜热镜的保温性能优于传统镀银薄膜。

Schuler 等<sup>[23]</sup>用醋酸锌、异丙醇、二乙醇胺、硝酸铝及乙醇等制成了电阻率为  $5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  的 10 层

AZO 薄膜。Tang W<sup>[24]</sup>等采用溶胶-凝胶工艺制备出电阻率达  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 、透射率达 90% 的 ZAO 薄膜,已能满足工业化生产的要求。但是,溶胶-凝胶工艺制备的 TCO 薄膜必须经超过 200℃ 的后续退火处理,无法满足在聚合物等衬底上制备 TCO 薄膜的要求。尽管 A+Dahoudi 等<sup>[25]</sup>采用该工艺在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)表面经 UV 照射或 130℃ 退火处理制备出电阻率为  $25 \Omega \cdot \text{cm}$ ,透光率为 90% 的 ITO 薄膜。溶胶-凝胶工艺虽能大面积均匀成膜,但薄膜厚度与前驱溶液的粘度及提拉或旋涂速率有直接关系,较难精确控制,而且提拉法制备的薄膜前端与后端或者旋涂法制备的薄膜中心区域与外缘的厚度也有一定差别,影响了性能的高度均匀性。此外,设法降低该工艺后续退火处理的温度,提高 TCO 薄膜的质量和光电性能,扩大应用领域,仍然是该工艺制备 TCO 薄膜值得进一步努力的方向。

### 2.4 喷射热分解法 TCO 薄膜的制备

喷射热分解法是由制备太阳能电池透明电极而发展起来的薄膜制备方法。该方法与常压/低压化学气相沉积、磁控溅射、溶胶-凝胶技术相比,具有设备简单、沉积速率高、容易选取廉价反应物、易实现大面积沉积,降低制备成本等优点。

Ramakrishna R<sup>[26]</sup>等采用喷射热分解法研究了高取向、高电导率的  $\text{ZnO}:\text{Ca}$  透明导电氧化物薄膜,在掺杂 Ca 的原子分数为 5%、基片温度为 350℃ 的条件下,获得电阻率为  $7.6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,透光率 > 85% 的  $\text{ZnO}:\text{Ca}$  薄膜。Szanyi J nos<sup>[27]</sup>研究了采用热解反应制备的  $\text{SnO}_2:\text{F}$ ,当沉积温度大于 410℃ 时,膜中容易出现乳白色的白雾,使薄膜的透过率降低,影响其使用。而沉积温度降低,沉积率相应也要降低,同时,沉积薄膜容易出现非晶。为了解决此问题,雷智等<sup>[28]</sup>系统研究了反应添加物比例优化及气体喷头改进对薄膜结构和光电性质等的影响,并且在 320~380℃ 温度范围,沉积出透明低阻的  $\text{SnO}_2:\text{F}$  薄膜,该薄膜在可见光区的透过率达 80%~90%。由于采用喷射热分解工艺制备的薄膜厚度与载气流量及溶液雾化微粒线度有关,使得喷射热分解工艺对薄膜厚度的控制相对困难,从而影响了薄膜性能的控制。

### 2.5 柔性衬底 TCO 薄膜的制备

与在硬质衬底上沉积的 TCO 薄膜相比,在柔性衬底上制备的透明导电膜不但可以保持硬质衬底透明导电膜的光电特性,而且具有可卷曲、质量轻、不易破碎、易于大面积生产、便于运输等许多独特的优点。这种薄膜可广泛应用于制备柔性衬底太阳能电池、柔性液晶显示器和柔性发光器件,也可用作柔性透明电磁屏

蔽及触敏覆盖层等,还可作为透明隔热保温材料用于塑料大棚、民用建筑玻璃和汽车玻璃贴膜。随着柔性衬底 TCO 薄膜制备工艺的逐步成熟,柔性衬底透明导电膜有望获得更加广泛的应用。

许多有机材料已被尝试作为柔性衬底用于制备透明导电氧化物薄膜,尤其是制备 ITO 薄膜。近年来,许多研究者采用不同的制备技术在米拉(Mylar)、聚碳酸酯、聚丙烯、聚丙烯己二酯(PPA)、聚乙烯对苯二甲酯(PET)、聚酰亚胺等有机材料上成功制备了 ITO 及 ZAO 薄膜。

John<sup>[29]</sup>等采用离子束溅射方法在米拉薄膜衬底上制备 ITO 薄膜,研究了氧气氛对薄膜结构与性能的影响。他们发现,当氧分压在  $2.7 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$  Pa

的范围内时,可得到电阻率约为  $5.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,可见光透过率超过 80%,红外反射率达到 84% 的 ITO 薄膜。Yang 等人<sup>[30]</sup>首次在有机材料 PPA 上成功制备出了 ZAO 透明导电薄膜,该膜与硬质衬底上生长的薄膜有相同的结构(002)面的单一择优取向的多晶六角纤锌矿结构,其  $c$  轴垂直于衬底。薄膜电阻率为  $1.84 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ,载流子浓度超过  $4.62 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ,霍耳迁移率为  $7.34 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,300nm 厚薄膜的可见光透过率超过 84%。

当然,其他一些薄膜制备技术,如化学气相沉积等也被应用于制备透明导电薄膜,并且在某些方面有其自身的优势。表 1 列出了不同制备技术制备的 ZAO 薄膜的性质。

表 1 不同制备技术制备 ZAO 薄膜的性质<sup>[31-33]</sup>  
Table 1 Properties of ZAO thin films prepared by using different technologies<sup>[31-33]</sup>

Preparation technology	Temperature/℃	Deposition rate/(nm·min <sup>-1</sup> )	Resistivity/(10 <sup>-4</sup> Ω·cm)	Transmittance/%
Chemical vapor deposition	367~444		3	85
Spray pyrolysis	300~500		10	85
Sputtering	200	0.7~27.4	1.4~3	90
Magnetron sputtering	60~120		6	>85
RF magnetron sputtering	200	4.2~16	1.4~3.0	90
DC magnetron sputtering	30~270		5	>82
Sol-gel	500		2~5	90
Pulse laser deposition	200		3.7	90

3 结束语

随着应用领域的不断扩大,对透明导电薄膜的物理性质和化学性质提出了更高的要求。因此,必须不断改进 TCO 薄膜的制备方法,而且努力的方向应体现完善薄膜性能、降低反应温度、提高控制精度、降低制备成本和适应集成化等趋势。对不同的薄膜材料、不同的衬底和不同的应用目的,研究有针对性的制备方法,发展低温制备技术、柔性衬底制备方法以及低成本制造工艺,使工艺的适应性更好,薄膜的应用领域更广,器件的制造成本更低。

(1) 针对平面显示和太阳能电池等应用领域,继续提高薄膜的可见光透过率和降低薄膜的电阻率。除了工艺技术和参数的改进,如何提高 TCO 薄膜的迁移率是降低薄膜的电阻率同时保证其较高光学性能的努力方向之一。

(2) 针对建筑采暖等大面积应用领域,溶胶-凝胶、喷雾热分解等大面积、低成本制备工艺合成 SnO<sub>2</sub>:F 等低成本、高红外反射率 TCO 薄膜应该是研究的重

点。

(3) 寻找更好的柔性衬底和开发相应的制备工艺。尽管在柔性衬底上制备的透明导电膜可以保持与硬质衬底上制备时相当的光电特性,但是有机柔性衬底有一个致命的弱点就是不耐高温,这给薄膜的沉积带来一定的难度,而且薄膜的附着力较差。因此,合适的有机薄膜衬底的选择和适当的制备工艺的选取是今后工作的方向。

(4) 研究 p 型 TCO 薄膜材料的合成方法,开发 TCO 异质结和透明半导体器件。p 型透明导电薄膜及透明导电材料器件的研究时间不长,性能及制备方法都有待不断发展。

参考文献

[1] 赵谢群. 透明导电氧化物薄膜研究现状与产业化进展[J]. 电子元件与材料, 2000, 19(1): 40-41.  
[2] GORDON R G. Preparation and properties of transparent conductors[J]. Mat Res Soc Symp Proc, 1996, 426: 419-424.  
[3] 孟扬, 沈杰, 蒋益明, 等. 透明导电氧化物薄膜的新进展[J]. 光电

- 子技术, 2002, 22(3): 125– 130, 144.
- [4] YANAGI H, INOUE S, UEDA K, et al. Electronic structure and optoelectronic properties of transparent p-type conducting  $\text{CuAlO}_2$ [J]. J Appl Phys, 2000, 88(7): 4159– 4163.
  - [5] UEDA K, HASE T, YANAGI H, et al. Epitaxial growth of transparent p-type conducting  $\text{CuGaO}_2$  thin films on sapphire (001) substrates by pulsed laser deposition[J]. J Appl Phys, 2001, 89(3): 1790– 1793.
  - [6] SCHULER T, AEGERTER M A. Optical, electrical and structural properties of Sol-Gel  $\text{ZnO: Al}$  coatings[J]. Thin Solid Films, 1999, 351: 125– 131.
  - [7] HOSONO H, OHTA H, ORITA M, et al. Frontier of transparent conductive oxide thin films[J]. Vacuum, 2002, 66: 419– 425.
  - [8] ELLER K. Magnetron sputtering RF transparent conductive zinc oxide: relation between the sputtering parameters and electronic properties[J]. J Phys D: Appl Phys, 2000, 33: R17– R32.
  - [9] HU Y H, LI J Z, Yu S F, et al. Rolling coating technology of high transparent and low square resistance[J]. Vacuum Technology and Application, 2001, (2): 36– 37.
  - [10] 王敏, 蒙继龙. 透明导电氧化物薄膜的研究进展[J]. 表面技术, 2003, 32(1): 5– 7.
  - [11] 吕建国, 汪雷, 叶志镇, 等.  $\text{ZnO}$  薄膜应用的最新研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2002, 8(3): 303– 308.
  - [12] WENDT R, ELLMER K. Desorption of Zn from a growing  $\text{ZnO: Al}$  film deposited by magnetron sputtering[J]. Surface and Coating Technology, 1997, 93: 27– 31.
  - [13] ELLMER K, WENDT R. DC and RF (reactive) magnetron sputtering of  $\text{ZnO: Al}$  films from metallic and ceramic target: a comparative study[J]. Surface and Coating Technology, 1997, 93: 21– 26.
  - [14] ELLMER K. Influence of discharge parameters on the layer properties of reactive magnetron sputtered  $\text{ZnO: Al}$  films[J]. Thin Solid Films, 1994, 247: 15– 23.
  - [15] MINAMIT, HANTO H, SATO H, et al. Effect of applied external magnetic field on the relationship between the arrangement of the substrate and the resistivity of aluminum-doped  $\text{ZnO}$  thin films prepared by RF magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 1998, 164: 275– 279.
  - [16] 姜健, 巴德纯, 闻立时.  $\text{ZnO: Al}$  薄膜的制备和工艺参数对其电阻率的影响[J]. 真空, 2000, 6: 24– 28.
  - [17] BAES H, LEES Y, KIM H Y, et al. Comparison of the optical properties of  $\text{ZnO}$  thin films grown on various substrates by pulsed laser deposition[J]. Applied Surface Science, 2000, 168(4): 332– 334.
  - [18] JOSEPH M, TABATA H, SAEKI H, et al. Fabrication of the low-resistive p-type  $\text{ZnO}$  by codoping method[J]. Physica B, 2001, 302– 303: 140– 148.
  - [19] MUKHERJEE P, CUFF J B. Plume expansion and stoichiometry in the growth of multi component thin films using dual laser ablation[J]. Applied Surface Science, 1998, 127– 129: 620– 625.
  - [20] ADURODIJA F O, IZUMI H. Effect of laser irradiation on the properties of indium tin oxide films deposited by pulsed laser deposition[J]. Applied Surface Science, 2002, 6: 114– 121.
  - [21] KIM H, PIQUE A. Effect of aluminum doping on zinc oxide thin films grown by pulsed laser deposition for organic light-emitting devices[J]. Thin Solid Films, 2000, 12: 798– 802.
  - [22] 胡少六, 江超, 龙华, 等. AZO 薄膜双靶 PLD 沉积及其光学性能分析[J]. 压电与声光, 2004, 26(2): 119– 121.
  - [23] SCHULER T, AEGERTER M A. Optical, electrical and structural properties of sol-gel  $\text{ZnO: Al}$  coatings[J]. Thin Solid Films, 1999, 351: 125– 131.
  - [24] TANG W, CAMEROND C. Aluminum-doped zinc oxide transparent conductors deposited by the sol-gel process[J]. Thin Solid Films, 1994, 238: 83– 87.
  - [25] AL-DAHOUDI N, BISHT H. Transparent conducting, anti-static and anti-static-anti-glare coating on plastic substrates[J]. Thin Solid Films, 2001, 392: 299– 304.
  - [26] RAMAKRISHNA R K T. Highly oriented and conducting  $\text{ZnO: Ca}$  layers grown by chemical spray pyrolysis[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 3: 110– 113.
  - [27] SZANYI J. The origin of haze in CVD tin oxide thin films[J]. Applied Surface Science, 2002, 185(3): 161– 171.
  - [28] 雷智, 冯良桓, 张静全, 等. 低温制备透明导电膜  $\text{SnO}_2: \text{F}$  及其结构和性质研究[J]. 高技术通讯, 2004, 1: 52– 55.
  - [29] JOHN C C F. Preparation of Sn-doped  $\text{In}_2\text{O}_3$  (ITO) films at low deposition temperatures by ion-beam sputtering[J]. Appl Phys Lett, 1979, 34(8): 515– 517.
  - [30] YANG T L, ZHANG D H, MA J, et al. Transparent conducting  $\text{ZnO: Al}$  films deposited on organic substrates deposited by RF magnetron-sputtering[J]. Thin Solid Films, 1998, 326: 60– 62.
  - [31] 孙超, 陈猛, 裴志亮, 等. 透明导电膜  $\text{ZnO: Al}$  (ZAO) 的组织结构与特性[J]. 材料研究学报, 2002, 16(2): 113– 120.
  - [32] TANG W, CAMEROND C. Aluminum-doped zinc oxide transparent conductors deposited by the sol-gel process[J]. Thin Solid Films, 1994, 238: 83– 87.
  - [33] KIM H, PIQUE A. Effect of aluminum doping on zinc oxide thin films grown by pulsed laser deposition for organic light-emitting devices[J]. Thin Solid Films, 2000, 12: 798– 802.

收稿日期: 2005-02-21; 修订日期: 2005-07-12

作者简介: 王华(1965–), 男, 博士, 副教授, 主要从事功能材料与器件领域的研究, 联系地址: 桂林电子工业学院信息材料科学与工程系(541004)。