

PECVD 制备 AZO(ZnO:Al)透明导电薄膜^{*}

陈兆权 刘明海[†] 刘玉萍 陈 伟 罗志清 胡希伟

(华中科技大学电气与电子工程学院,核聚变与电磁新技术教育部重点实验室,武汉 430074)

(2008 年 8 月 30 日收到 2008 年 10 月 17 日收到修改稿)

采用 PECVD(等离子体增强化学气相沉积)工艺在普通玻璃和 Si 基上制备出了方块电阻低至 $89\ \Omega$,可见光透过率高达 79%,对基体附着力强的多晶态的 AZO(ZnO:Al)薄膜.采用 PECVD 法制备 AZO 薄膜是一种有益的尝试,AZO 透明导电薄膜不仅具有与 ITO(透明导电薄膜,如 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$)可比拟的光电特性,而且价格低廉、无毒,在氢等离子体环境中更稳定,所获结果对实际工艺条件的选择具有一定借鉴作用和参考价值.

关键词:AZO(ZnO:Al), 等离子体增强化学气相沉积, 透明导电薄膜

PACC:8115J, 8120, 6170T

1. 引 言

薄膜材料是材料学领域的重要研究内容之一,它涉及物理、化学、电子、生物、冶金等学科,在电子器件、光学器件、航空航天、国防等各方面均有广泛的应用.目前,对薄膜材料的研究正向多种类、高性能、新工艺等方面发展,新型薄膜材料的应用范围正在不断地扩大.薄膜材料的类型主要包括导电薄膜、电介质薄膜、超导薄膜、磁性薄膜、压电薄膜以及光电薄膜等.除此之外,透明导电薄膜也已成为薄膜材料领域又一新的研究热点.透明导电薄膜是一种既能导电又在可见光范围内具有高透射率的一种薄膜材料.透明导电薄膜的种类很多. Au, Ag, Pt, Cu, Rh, Pd, Al, Cr 等金属在形成 3—15 nm 厚的薄膜时,都有某种程度的可见光透光性,曾被用做透明电极^[1].但由于金属薄膜对光吸收太大,硬度低而且稳定性差,人们开始研究氧化物、氮化物、氟化物等透明导电薄膜的制备及其物性.其中,金属氧化物构成的透明导电材料(transparent conducting oxide,简称为 TCO)占据主导地位,而且近年来的应用领域及需求量不断地扩大. In_2O_3 基薄膜($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ 简称 ITO)在 TCO 薄膜中扮演主角,其应用范围涉及平板显示器、液晶显示器等大部分光电子器件. SnO_2 基薄膜是最早获得具有应用价值的 TCO 膜.早期的 SnO_2 薄膜由于没

有掺杂,其光电性能都不及后来掺杂的 SnO_2 薄膜.因而现在得到应用的是掺杂的 SnO_2 薄膜,掺杂效果最好的是 $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ (简称 ATO)薄膜, $\text{SnO}_2:\text{F}$ (简称 FTO)薄膜.但是,由于这两种薄膜中 In 和 Sn 元素在自然界中的储存量少,从而导致生产成本很高;而且, Sn 和 In 材料的化学性质活泼,制备过程中工艺条件不易控制,技术难度大.另外, Sn 和 In 的原子量较大,成膜过程中容易渗入到衬底内部,毒化衬底材料,尤其在液晶显示器件中污染现象严重.而 ZnO:Al(简称 AZO)透明导电薄膜中的 Zn 源,价格便宜,来源丰富,无毒,并且在氢等离子体中稳定性要优于 ITO, ATO 等,同时具有可与 ITO 相比拟的光电特性^[2-7].所以, AZO 薄膜目前已成为 TCO 薄膜领域的研究热点^[8-12],本文正是着眼于研究出一种新的 AZO 薄膜制备技术(PECVD),其成本低,能耗小,成膜质量高.

2. AZO(ZnO:Al)薄膜的特性及其应用

ZnO 是一种极性半导体, ZnO 晶体的晶格常数为 $a = 0.325\ \text{nm}$, $c = 0.521\ \text{nm}$.在氧化锌晶体中,氧离子与锌离子呈六角密堆,相互套构,组成纤锌矿结构,锌离子与氧离子的配位数均为 4,每一个锌原子都位于四个相邻的氧原子所形成的四面体间隙中,但只占据其中半数的氧四面体间隙,氧原子的排列

^{*} 国家教育部留学回国人员科研启动基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: mhliu@mail.hust.edu.cn

情况与锌原子相同. 单位晶格中含有两个分子, 体积 $V = 0.047615 \text{ nm}^3$, 因而这种结构比较开放, 间隙原子的生成焓比较低, 半径较小的原子容易形成间隙原子, 所以在 ZnO 薄膜中掺入一定量的 Al 原子就很容易形成间隙固溶体式的薄膜. 本征氧化锌薄膜的电阻率高于 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$. Al 掺杂的引入可使其导电性能大幅提高, 电阻率可降低到 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 数量级. AZO 薄膜中存在两种点缺陷——本征缺陷和杂质缺陷. 这些缺陷的存在破坏了晶粒质点的有序排列, 对薄膜的性质, 如导电性、透光性等有很大影响. 杂质缺陷是指由于加入添加物而在氧化锌晶粒中所形成的缺陷. 掺入 Al 时, 由于铝离子的半径 ($R_{\text{Al}} = 0.057 \text{ nm}$) 比锌的离子半径 ($R_{\text{Zn}} = 0.083 \text{ nm}$) 小, 铝原子容易变成替位原子占据锌原子的位子, 也容易成为间隙原子而存在. Al 原子趋向于以 Al^{3+} 的方式发生固溶, Al^{3+} 离子占据晶格中 Zn^{2+} 离子的位置, 与周围元素形成共价键. Al 的价电子数比 Zn 多一个, 出现了弱束缚的电子, 这个多余的电子只需要很少一点能量, 就可以摆脱束缚, 成为 ZnO 薄膜中共有化运动的自由电子, 即导带中的电子. 掺杂铝 ZnO 薄膜中, 导电非平衡载流子主要是电子, ZnO:Al 薄膜为 n 型半导体, Al 原子为施主杂质. 因此掺 Al 的结果是增加了净电子, 使晶粒电导率增加. 所以, AZO 薄膜具有优异的导电性能. 由于 AZO 膜的禁带宽度 (3.37 eV) 大于可见光子能量 (3.1 eV), 在可见光照射下不会引起本征激发, 所以对可见光是透明的, 透射率可高达 80%—90%. Al 掺杂对膜的透射率影响不大. 人们发现, 透明导电膜都存在“蓝移”(Burstin-Moss effect) 现象. 这是因为掺杂使得晶粒尺寸减小, 产生的量子效应导致半导体的能隙变宽, 半导体的发光带或吸光带由长波移向短波, 发光的颜色从红光移向蓝光.

随着 AZO 透明导电薄膜的制备技术日益成熟, 它的应用领域也越来越广泛, 而且新的应用领域不断被开拓出来^[13,14]. 透明导电薄膜是平板显示的基础材料, 目前 AZO 薄膜的电学性能已经完全能达到液晶显示器对电极的要求, 并且因为 AZO 薄膜性能稳定而不会污染液晶显示器. 在太阳能电池上, 透明导电膜可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^[15]. 此外, 在防静电膜、电磁波屏蔽、面发热膜、热反射镜、气敏传感器、红外隐身材料和半导体器件材料等方面均有广泛的应用, 具有产业化前景^[16,17].

3. AZO(ZnO:Al) 薄膜的 PECVD 制备

等离子体增强化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, 简称 PECVD) 是利用放电产生的等离子体中的活性原子和自由基, 在低温衬底上沉积各种化合物薄膜. 它是在普通的热 CVD 法的基础上发展起来的一种新的薄膜制备技术. 当对低压容器中的气体加上电场时, 存在于气体中的极少数电子被加速, 在低压下其平均自由程大, 很容易被加速至高速, 与中性原子和分子碰撞, 失去能量. 如碰撞是弹性的, 则中性原子和分子的动能增加, 气体温度上升, 如为非弹性的, 则原子和分子发生激发、离解及电离化, 结果产生许多不同离子和原子团. 这些粒子均是化学活性的, 可生成新粒子并能参与反应. 新生的电子又被加速, 与其他原子、分子碰撞, 重复上述过程, 气体急速电离, 形成等离子体状态. PECVD 方法的最大优点是, 由于在等离子体状态下利用化学性质活泼的离子、原子团, 因而可以在低温下生成薄膜, 热损伤较少, 抑制了与基片物质的反应, 可在非耐热性基片上成膜. 由于这些处理和装置都源于微电子工业, 因而具有高产的好前景^[18-23].

PECVD 方法是把低压原料气体导入装置内, 对其输入电能, 使其成为等离子体状态, 通过反应在基片上制作薄膜. 图 1 所示的 PECVD 系统是本课题组自行设计的. 该 PECVD 系统主要由电源系统、放电系统、反应室系统、抽气系统、气体导入系统、压力测量系统、加热温控系统、控制与监视系统组成.

本实验采用固态源 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (掺杂源), 使用载气 N_2 气将升华成气态的反应物质带至加热的衬底, 真空室内采用高频放电产生等离子体, 高能电子使反应物分子键断裂, 产生大量的活性基团. 这些基团不断吸附在基板表面, 由于基团表面化学反应最终在硅片和玻璃表面生长出 AZO(ZnO:Al) 薄膜.

4. AZO(ZnO:Al) 薄膜的性能及工艺参数影响

由于工艺参数对薄膜的性能和结构的影响, 通过调整工艺参数, 可以改变薄膜的沉积速率、表面形貌、晶体结构、结晶质量以及薄膜的实用性能. 因

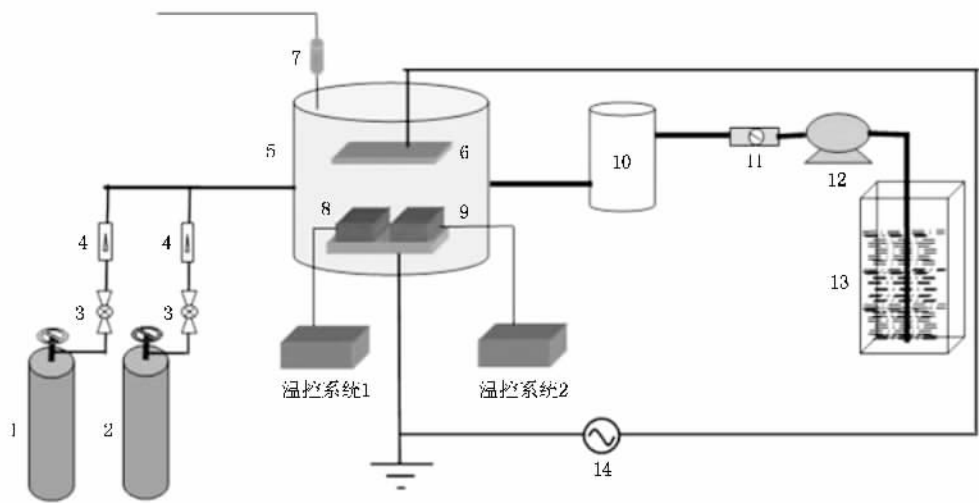


图1 PECVD 系统装置原理图 1. Ar 气,2.N₂ 气,3. 减压阀,4. 流量计,5. 反应腔,6. 平行板电极,7. 真空计,8. 反应源加热台,9. 衬底加热台,10. 过滤器,11. 电磁阀,12. 真空泵,13. 尾气处理装置,14.40.6 MHz 的射频电源

此,我们需要探究在不同的薄膜沉积条件和后处理条件下,薄膜性能和结构的变化,从而确定最佳的薄膜制备工艺.

4.1. 薄膜成分分析

4.1.1. EDAX 电子能谱分析

利用场发射扫描电子显微镜的附件能谱仪对薄膜的成分进行了初步分析.图 2 EDAX 能谱图中除了衬底材料 Si 基的峰外,可以明显地观察到 Zn 峰和 O 峰的存在以及较弱的 Al 峰.扣除基底 Si 的成分和少量的杂质含量后,Zn 与 O 的原子数比为 47.32:49.83,此值稍稍偏离 ZnO 的完全化学计量比 1:1.而从掺 Al 元素的成分分析可以发现 Al 原子数比刚好接近这个偏离的差值,我们可以解释为 铝原子成为替位原子占据了锌原子的位子.

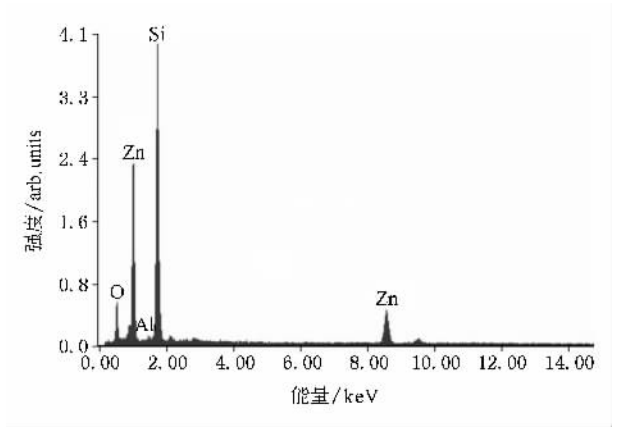


图2 Si 衬底上 AZO(ZnO :Al)薄膜 EDAX 图谱

4.1.2. XPS(X 射线光电子能谱)图分析

采用英国 KROTOS 生产的 800SIMS 多功能电子能谱仪(electron energy spectrometer)对实验所制备的 AZO 薄膜进行了 XPS 测试,激发源为 MgK α .通过全谱扫描发现除了 Zn \ O \ Al 外,还存在 C,S,Cl 等杂质.杂质的存在可能是因为实验中各种反应共用反应腔,清洗不彻底所造成的.

图 3(a)–(c) 分别为 AZO 薄膜表面 Zn 2p,Al 2p,O 1s 的 XPS 图谱,各能谱的对称性都很好.由于 AZO 薄膜中掺 Al 量很小,而且 Al 离子的散射截面小,所以检测出 Al 的信号很弱,但从 XPS 能谱图中仍然可以得出 Zn 2p,Al 2p 的结合能分别位于 1021.6 eV 和 73.9 eV,对照标准图谱可知,Zn,Al 分别是以 Zn²⁺ 和 Al³⁺ 形式存在的,而且无 Zn 和 Al 原子存在.另外根据单个原子电子结合能表可知 O 1s 的结合能为 531 eV,而 AZO 薄膜表面 O 1s 的 XPS 图谱中 O 1s 的结合能为 530.6 eV,即出现了化学位移.出现的原因在于 O 元素的价态改变,对照标准谱线可最终确定出 O 的化合价为 – 2 价.

4.2. 薄膜沉积速率的影响

为了探究薄膜沉积速率的影响因素,我们分别研究了沉积时间、衬底温度和衬底材料对沉积速率的影响,结果分别如图 4,5 和 6 所示.薄膜沉积时间越长薄膜的平均沉积速率越小,这是由于 放电时间变长,被电场加速的粒子对薄膜表面的轰击时间变长,这必然导致薄膜表面的温度上升很快,过高的表面温度会使得薄膜中 Zn 的蒸汽压升高,从而造成热

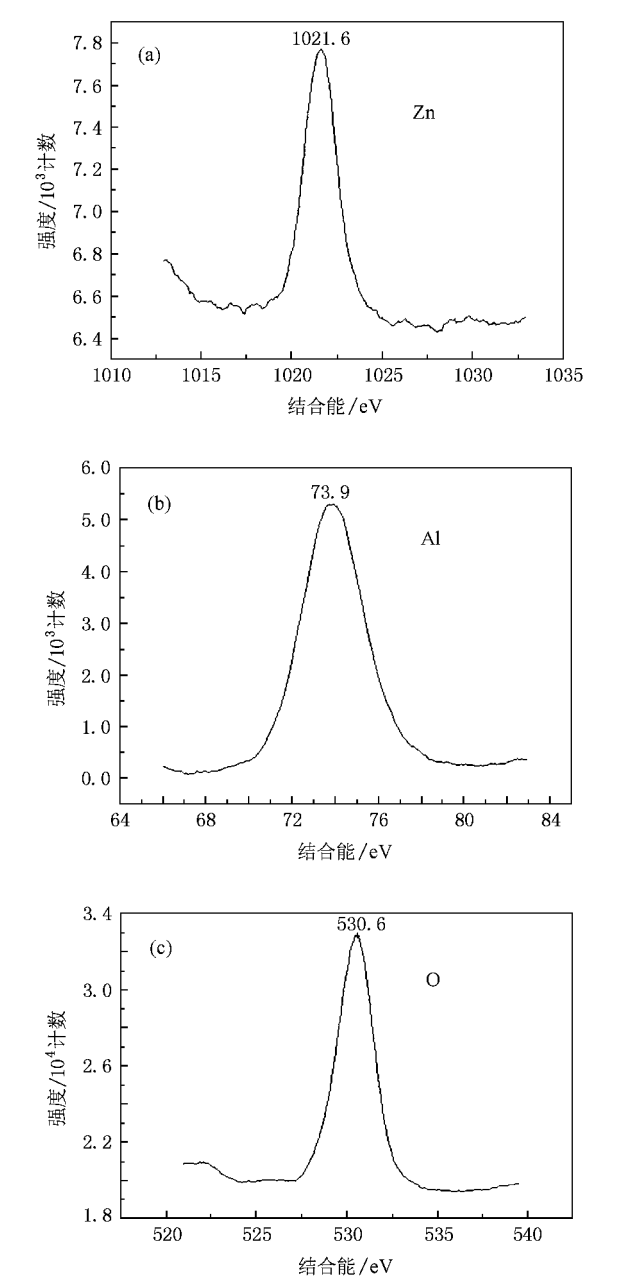


图3 AZO 薄膜表面的 XPS 图谱 (a) Zn 2p, (b) Al 2p, (c) O 1s 的 XPS 图谱

解吸现象,使得薄膜的沉积速率降低.基片温度较低时沉积速率随着衬底温度的升高而升高,基片温度较高时沉积速率随着衬底温度的升高而降低,这是因为:当衬底温度较低时,基片表面被吸附的原子数远大于解吸原子数,沉积速率较高;当基底温度升到300℃左右时,到达衬底上的原子数目与解吸原子数目达到平衡,使得沉积速率达到饱和状态;当衬底温度过高时,衬底上原子解吸速率增大,反而使薄膜的沉积速率降低.在相同的沉积温度下,相同的沉积

时间下,AZO 薄膜在硅基片上的沉积速率较玻璃的高,这是由于硅片是晶体结构,在其内部原子的排列是规则有序的,单晶基材表面有利于薄膜的外延生长,而玻璃是非晶态物质,其内部原子排列是长程无序状态,因而不利于晶体的外延生长.

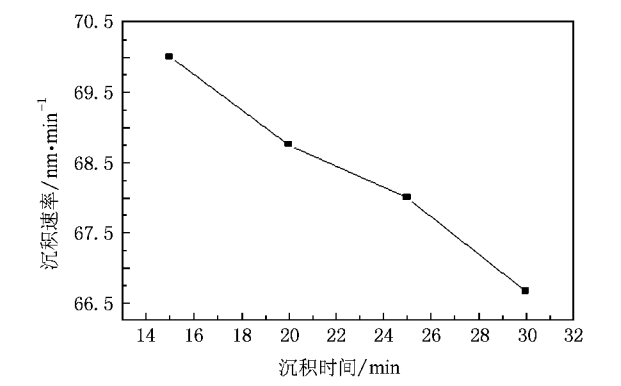


图4 沉积速率随沉积时间变化情况

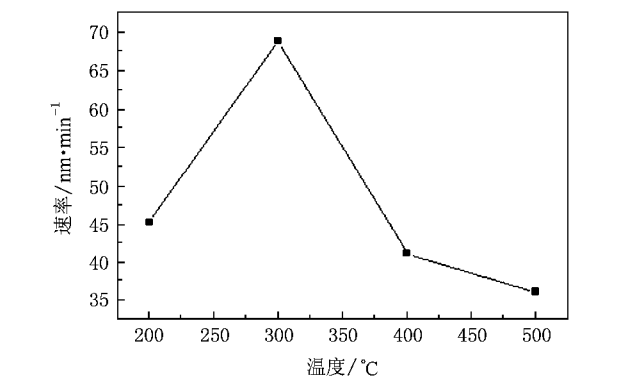


图5 沉积速率随衬底温度的变化情况

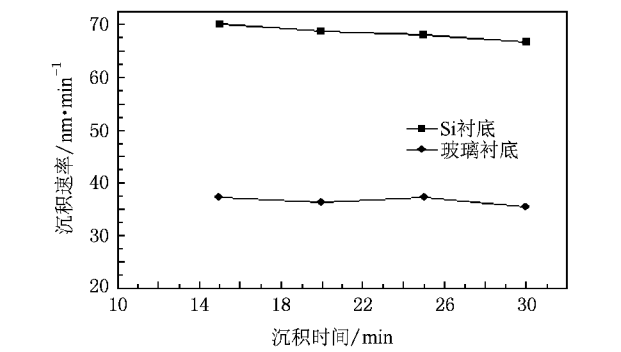


图6 衬底材料对薄膜沉积速率的影响

4.3. 温度对 AZO 薄膜性能的影响

为了探究 AZO 薄膜性能的影响因素,我们研究

了衬底温度分别对薄膜表面形貌和晶体结构的影响,结果分别如图 7 和图 8 所示.可见,当衬底温度较低时薄膜结晶质量不好,当衬底温度过高时,其表面形貌随着温度的增高而趋于无序. Akiran 等^[24]认为,这种表面形貌随衬底温度变化的现象是由于 ZnO 晶体生长时各种取向的表面能不同而引起的. 对于应用于 Si 基薄膜太阳能电池的前电极,当 AZO 薄

膜的表面形貌为平坦的镜面时,不利于增加入射光的折射,从而不利于增加薄膜太阳能电池中的光程. AZO 薄膜的表面形成类金字塔形的绒面时,有利于增加薄膜太阳能电池内的光程,进而满足形成薄膜太阳能电池所需的陷光材料的要求. 所以当衬底温度为 300 ℃左右时比较适合生长用于 Si 基薄膜太阳能电池的前电极的 AZO 透明导电薄膜.

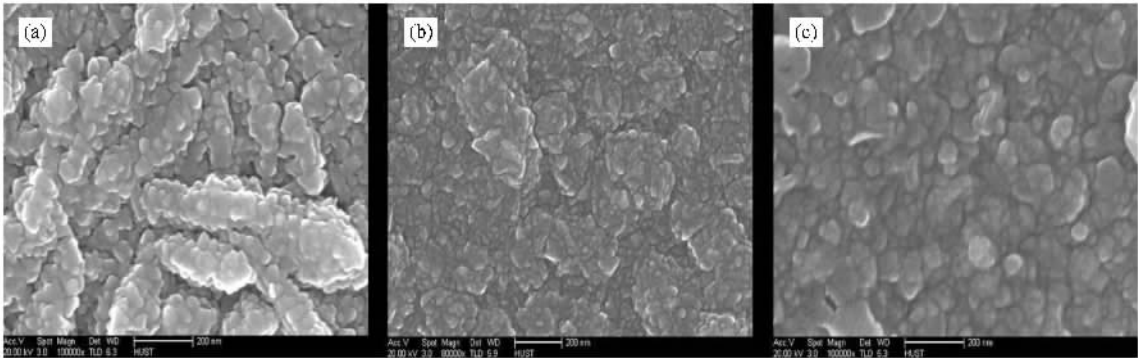


图 7 衬底温度对 AZO 薄膜表面形貌的影响 (a) 200℃, (b) 300℃, (c) 400℃

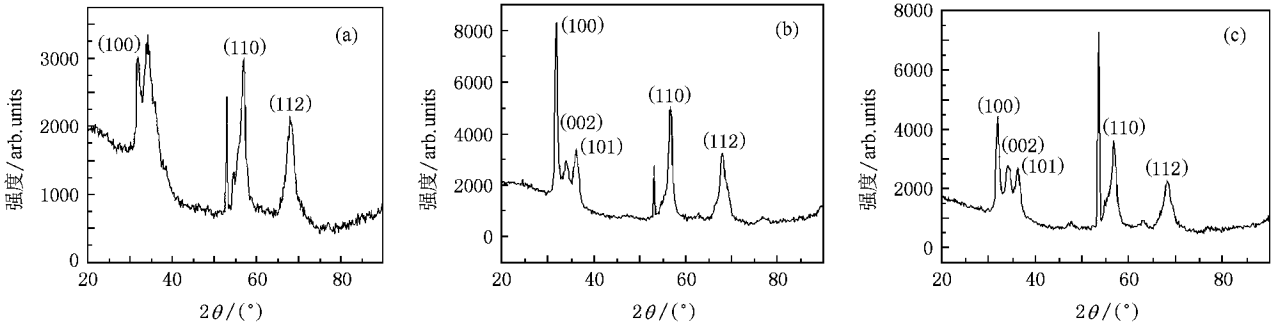


图 8 衬底温度对 AZO 薄膜晶体结构影响的 XRD 图谱 (a) 200℃, (b) 300℃, (c) 400℃

4.4. 膜厚对 AZO 薄膜光电性能的影响

图 9(a) 给出了不同厚度的 AZO (ZnO :Al) 薄膜的紫外-可见光的透射光谱. 不同厚度的薄膜, 可见光透过率在近紫外短波区域都完全降低了. 由于厚度效应的作用, 随着薄膜厚度的增加, 可见光区域平均透过率呈下降趋势 (如图 9(b) 所示). 薄膜方块电阻随薄膜厚度的变化关系图 10(a) 所示, 随着膜厚的增加, 方块电阻逐渐下降. 这是因为随着薄膜厚度的增加, 薄膜结晶度的提高和晶粒尺寸的增加, 弱化了晶粒间界散射, 提高了载流子的寿命和迁移率, 参与导电的载流子的数目也不断增加, 薄膜的方块电阻自然而然也就下降了.

由上述分析发现随着薄膜厚度的增加电阻率逐

渐降低, 但是随着薄膜厚度的增加, 薄膜的可见光区域的透过率也在降低. 我们的目的是要在同一材料上实现可见光区高透过率和材料的低电阻率. 为了解决这一矛盾必须有一个折中的方法. Haacke^[25] 定义了优良指数, 即薄膜的质量 (品质) 因数 $\varphi = T^{10} / R_{sh}$, 它给出了薄膜性能的一个标准, 其中 T 为薄膜的透射率, R_{sh} 为薄膜的方块电阻. 图 10(b) 给出了优良指数与薄膜沉积厚度的关系曲线, 在可见光区域, 1060 nm 厚的薄膜的优良指数高于其他厚度的薄膜, 那是因为厚度为 1060 nm 时玻璃基 AZO 薄膜同时具有较低的方块电阻 (89 Ω) 和较高的可见光平均透射率 (73%, 其中玻璃基在可见光平均透过率为 92%). 如果扣除基片的影响, 则薄膜的平均透过率为 79%.

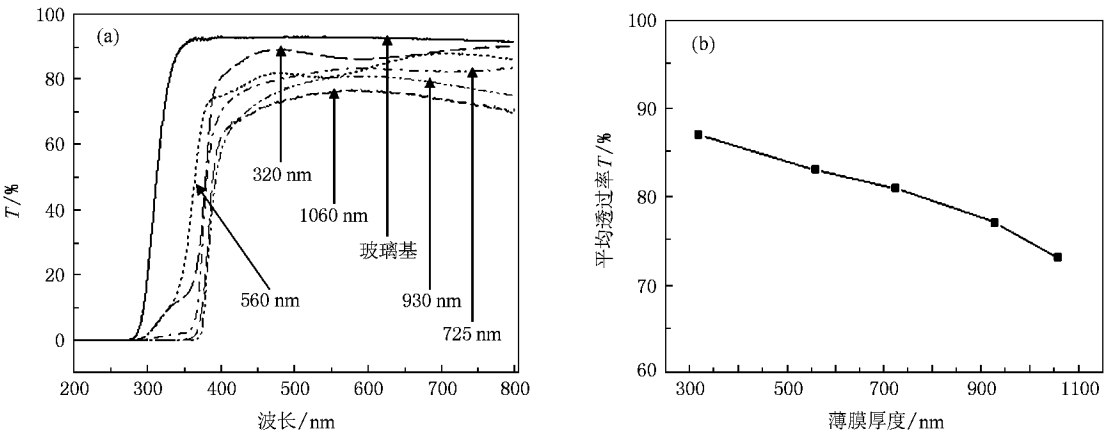


图 9 膜厚对 AZO 薄膜光学性能的影响 (a)透射光谱,(b)平均透过率

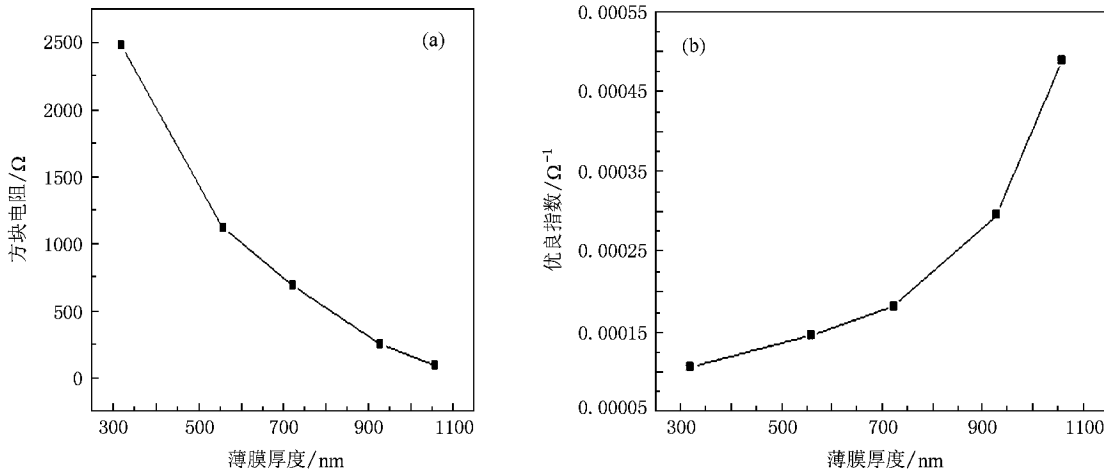


图 10 薄膜的光电性能的变化曲线 (a) 薄膜方块电阻随薄膜厚度的变化曲线,(b) 薄膜优良指数随薄膜厚度的变化曲线

5. 结 论

本文讨论了工艺参数对 AZO 薄膜沉积速率、晶体结构、表面形貌、光电特性的影响。薄膜沉积时间越长薄膜的平均沉积速率越小;衬底温度为 300 ℃左右时薄膜沉积速率高,成膜质量好;单晶 Si 片较普通玻璃更有利于 AZO 薄膜外延生长;沉积时间 30

min,膜厚为 1060 nm 时玻璃基 AZO 薄膜同时具有较低的方块电阻(89 Ω)和较高的可见光平均透射率 79%。透明导电薄膜的研究与发展一直是光伏电池研究的一个重要方面,尤其是近年来,AZO(ZnO :Al)薄膜各种制备技术的研究方兴未艾,综合考虑,利用 PECVD 法制备出价格低廉、无毒的 AZO 透明导电薄膜,是一种有益的尝试。

[1] Han X, Xia H 1998 *Electronic Component and Material* 17 30 (in Chinese) [韩 雪、夏 慧 1998 电子元件与材料 17 30]

[2] Groenen R, Sommeling P M, Linden J L, Hamers E A, Schropp R E I, van de Sanden M C M 2001 *Thin Solid Films* 392 226

[3] Rech B, Wieder S, Löffel A, Reetz W, Wagner H 1997 *the 26th PVSC Anaheim* 619

[4] Hayashi K, Kondo M, Ishikawa A, Yamagishi H 1994 *First WCPEC Hawaii* 674

[5] Banerjee A, Hofman K, Xu X, Yang J, Guha S 1994 *First WCPEC Hawaii* 539

[6] Steven S H, Wayne A B 1997 *the 26th PVSC Anaheim* 603

[7] Ruhi K, Bengu K 2002 *Turk J. Phys.* 26 363

- [8] Qin X J, Shao G J, Liu R P, Wang W K 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2409 (in Chinese) [秦秀娟、邵光杰、刘日平、王文魁 2005 物理学报 **54** 2409]
- [9] Tang B, Deng H, Shui Z W, Wei M, Chen J J, Hao X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5176 (in Chinese) [唐 斌、邓 宏、税正伟、韦 敏、陈金菊、郝 昕 2007 物理学报 **56** 5176]
- [10] Chen F, Gao Y T, Gen X H, Sun J, Wei C C, Xiong S Z, Zhang X D, Zhao Y, Zhu F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6697 (in Chinese) [陈 飞、高艳涛、耿新华、孙 建、魏长春、熊绍珍、张晓丹、赵 颖、朱 锋 2006 物理学报 **55** 6697]
- [11] Cao L, Liu R B, Pan A L, Wang F F, Zou B S 2007 *Chin. Phys. B* **16** 1790
- [12] Li X J, Sun X R, Xu H J, Yao Z T 2007 *Chin. Phys. B* **16** 3108
- [13] Tian M B, Liu D L 1991 *Thin Film Science and Technical Manual* (Beijing: Mechanical Industry Publishing House) p601 (in Chinese) [田民波、刘德令 1991 薄膜科学与技术手册(下)(北京机械工业出版社)第 601 页]
- [14] Fan Z X 2000 *Optoelectronic Technology* **20** 255 (in Chinese) [范志新 2000 光电子技术 **20** 255]
- [15] Zhou J W, Tan D H, Luo Z, Han L L, Cao Y 2006 *Vacuum and Low Temperature* **12** 9 (in Chinese) [周健伟、覃东欢、罗 潺、韩丽丽、曹 镛 2006 真空与低温 **12** 9]
- [16] Lü J G, Wang L, Ye Z Z, Zhao B H 2002 *Journal of Functional Materials and Component* **8** 303 (in Chinese) [吕建国、汪 雷、叶志镇、赵炳辉 2002 功能材料与器件学报 **8** 303]
- [17] Yao N, Zhang L, Yang S E, Zhang B L, Bian C 2003 *Vacuum and Low Temperature* **9** 113 (in Chinese) [姚 宁、张 兰、杨仕娥、张兵临、边 超 2003 真空与低温 **9** 113]
- [18] Liu Y P, Chen F, Guo A B, Li B, Dan M, Liu M H, Hu X W 2007 *Vacuum and Low Temperature* **13** 1 (in Chinese) [刘玉萍、陈 枫、郭爱波、李 斌、但 敏、刘明海、胡希伟 2007 真空与低温 **2007** **13** 1]
- [19] Guo A B, Liu Y P, Chen F, Li B, Dan M, Liu M H, Hu X W 2006 *Surface Technology* **35** 5 (in Chinese) [郭爱波、刘玉萍、陈 枫、李 斌、但 敏、刘明海、胡希伟 2006 表面技术 **35** 5]
- [20] Chang J F, Wang H L, Hon M H 2000 *J. Cryst. Growth* **211** 93
- [21] Hong R J, Jiang X, Szyszka B, Sittinger V, Pflug A 2003 *Appl. Surf. Sci.* **207** 341
- [22] Fu E G, Zhuang D M, Zhang G, Zhao M, Yang W F 2004 *Microelectronics Journal* **35** 383
- [23] Wang W W, Diao X G, Wang Z, Yang M, Wang T M, Wu Z 2005 *Thin Solid Films* **491** 54
- [24] Wilson W W, Akiran Y 1994 *First WCPEC Hawaii* 587
- [25] Haacke G 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 4086

Fabrication of transparent conductive AZO (ZnO :Al) film by plasma enhanced chemical vapor deposition *

Chen Zhao-Quan Liu Ming-Hai[†] Liu Yu-Ping Chen Wei Luo Zhi-Qing Hu Xi-Wei

(Key Laboratory of Fusion and Advanced Electromagnetic Technology of Ministry of Education, College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 30 August 2008 ; revised manuscript received 17 October 2008)

Abstract

AZO(ZnO :Al) polycrystalline thin films with strong adhesion to the substrate, as low as $89\ \Omega$ of sheet electronic resistivity and as high as 79% of visible light transmittance, are fabricated by PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) method on glass and silicon substrate. The AZO film fabricated by PECVD is a useful attempt. The AZO transparent conductive film has the good photovoltaic properties like that of ITO ($\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$); moreover, it is cheap, more nontoxic, and more stable in hydrogen plasma environment than ITO. The results obtained are very important to the selection of the technical conditions.

Keywords: AZO (ZnO :Al), plasma enhanced chemical vapor deposition, transparent conductive film

PACC: 8115J, 8120, 6170T

* Project supported by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education of China.

[†] Corresponding author. E-mail: mhliu@mail.hust.edu.cn