材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021122202

沉积条件对室温下磁控溅射AZO薄膜微结构与光电性能的影响

莫敏静[1]，刘　哲[1]，马紫腾[1]，董志虎[1]，刘　雍[1]，魏长伟[2]，何春清[1*]

（1. 武汉大学 物理科学与技术学院 湖北省核固体物理重点实验室，武汉 430072；2. 武汉长弢新材料有限公司，武汉 430000）

摘　要： 通过控制室温下射频磁控溅射过程中不同的氩气工作气压、溅射功率和沉积时间，在石英玻璃上沉积Al掺杂ZnO(AZO)薄膜，探究了三种工艺条件对制备的AZO薄膜的微结构及光电性能的影响。所制备的AZO薄膜经500 ℃退火后均为六方纤锌矿结构，具有优异的透明度，在可见光范围内的平均透过率均在86%以上。在气压0.25 Pa、功率200 W下，溅射时间为10 min时，薄膜的电阻率低至5.04×10^{-3} Ω·cm，而溅射时间为15 min时，Haacke性能指数最优，为0.314×10^{-3} Ω^{-1}。结果表明，磁控溅射制备的AZO薄膜的晶体结构、方阻和透过率等特性与制备过程中的气压、功率和时间密切相关，通过评价性能指数可指导优化AZO薄膜的制备工艺。

关键词： AZO透明导电薄膜；射频磁控溅射；室温；气压；功率；沉积时间

中图分类号： TB383.2　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0561－06

Effect of Deposition Conditions on Microstructure and Photoelectric Properties of AZO Films by Magnetron Sputtering at Room Temperature

MO Minjing[1], LIU Zhe[1], MA Ziteng[1], DONG Zhihu[1], LIU Yong[1], WEI Changwei[2], HE Chunqing[1]

(1. Key Lab. of Nuclear Soild State Physics, School of Physics and Technol., Wuhan University, Wuhan 430072, CHN; 2. WuHan Chamtop New Materials Co., Ltd., Wuhan 430000, CHN)

Abstract: Al-doped ZnO (AZO) thin films were deposited on quartz glass by RF magnetron sputtering at room temperature with controlled working pressure, power and deposition time. The effects of three processing conditions on the microstructure and photoelectric properties of AZO thin films were investigated. After annealing at 500 ℃, all AZO films have hexagonal wurtzite structure and excellent transparency. The average transmittance of AZO films in visible light range is above 86%. At a pressure of 0.25 Pa with the power of 200 W, the resistivity of the thin film deposited for 10 min is as low as 5.04×10^{-3} Ω·cm, while the best performance index is 0.314×10^{-3} Ω^{-1} for 15 min. The results show that the crystal structure, square resistance and transmittance of AZO films prepared by magnetron sputtering are closely related to the working pressure, power and time during the preparation process, and the performance indexes can guide the optimization of AZO films preparation.

Key words: AZO transparent conductive film; RF magnetron sputtering; room temperature; pressure; power; deposition time

收稿日期：2021－12－22.

基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFA0210003)；国家自然科学基金项目(12075172,12074291,11875209).

* **通信作者：**何春清　　**E-mail:** hecq@whu.edu.cn

0 引言

半导体透明导电氧化物薄膜(TCO)因其导电率高、透过率好等优良的性能,被广泛应用于平板显示屏、太阳电池、发光二极管(LED)等领域[1]。目前较为常见的透明导电氧化物薄膜,主要有三种,分别是 ITO(Sn 掺杂 In_2O_3)、FTO(F 掺杂 SnO_2)、AZO(Al 掺杂 ZnO),其中 ITO 因其优越的光电性能,成为研究最广的材料。但是,铟存在资源稀有、价格昂贵等不足[2],因此寻求拥有与 ITO 一样优越的光电性能的替代品迫在眉睫。相比之下,用于制备 AZO 薄膜的 Al,Zn 元素具有资源丰富、价格低廉、无毒等优势,并且 AZO 的光电性能可与 ITO 媲美,因此 AZO 被视为 ITO 最优的替代品[3],成为目前的研究热点之一。

制备掺杂 ZnO 薄膜的方法有旋涂法[4]、脉冲激光沉积法[5]、溶胶-凝胶法[6]、磁控溅射[7-9]法等,磁控溅射法具有操作简单、沉积速率快、薄膜纯度高、成膜均匀等优点。为了提高 AZO 薄膜的光电性能,需要通过优化其制备工艺来调控薄膜微结构。本文利用磁控溅射法制备 AZO 薄膜,通过控制工作气压、溅射功率及溅射时间,系统地研究了不同沉积条件对 AZO 薄膜的晶体结构与光电性能的影响。结果表明,薄膜的制备条件对 AZO 薄膜的微结构与光电性能尤为重要。通过权衡薄膜的光电性能指数[10],优化了室温下磁控溅射制备 AZO 薄膜的工艺。

1 实验

首先将 2×2 cm 的石英玻璃依次用丙酮、无水乙醇、去离子水超声清洗 15 min,去除其表面的污染物,然后用高压氮气枪快速吹干后置于磁控溅射腔室中。本实验采用型号为 JSD300 的磁控溅射镀膜仪器,选用射频磁控溅射法,靶材是 AZO 靶(w_{ZnO} : $w_{Al_2O_3}$ = 98 : 2,纯度为 99.99%,靶材尺寸为 ϕ50 mm×5 mm),腔室真空抽至 5×10^{-4} Pa,溅射气体为 99.999%的高纯氩气,流量为 20 cm^3/min,温度为室温。先预溅射 10 min,各条件下的实验参数如表 1 所示。A 组功率为 150 W,控制气压 p 为 0.25~1.3 Pa,溅射时间 t 保持 30 min;B 组气压为 0.25 Pa,控制功率 P 为 50~250 W,再控制溅射时间变化使膜厚均保持在 120 nm(±5 nm);C 组气压为 0.25 Pa,功率为 200 W,控制溅射时间为 10~60 min,沉积的薄膜厚度分别为 42.5,90,119.1,170.2 和 299.9 nm。将各样品置于管式炉中,通入氩气(纯度为 99.999%,流量 100 cm^3/min),以 5 ℃/min 升温,并在 500 ℃保温 2 h。

表 1 各条件下的实验参数

实验参数	A 组	B 组	C 组
p/Pa	0.25,0.5 0.75,1.0,1.3	0.25	0.25
P/W	150	50,100 150,200,250	200
t/min	30	145,45 30,21,15	10,15 21,30,60

本实验使用椭圆偏光仪测量薄膜厚度,利用 X 射线衍射仪(XRD,型号 D8-Advanced)研究薄膜的晶型和结晶性分析,温度范围为 30°~80°。利用四探针法结合霍尔效应测量 AZO 薄膜的电学性质(电阻率、方阻、载流子浓度、迁移率)。通过紫外可见分光光度计(5000 UV-Vis-NIR Spectrophotometer)测量薄膜在波长 300~800 nm 的透过率,研究 AZO 薄膜的光学性能。

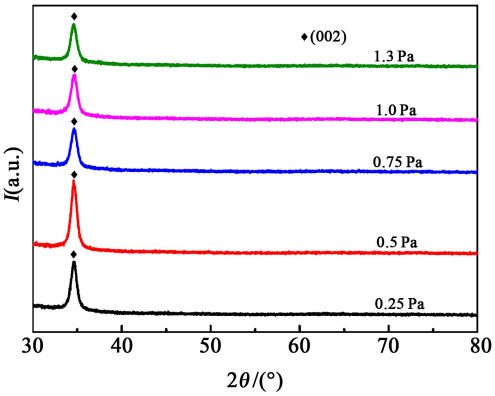
2 结果与讨论

2.1 微结构分析

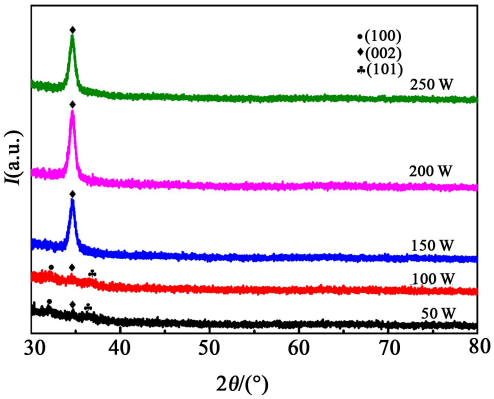
图 1(a)~(c)分别为控制 Ar 气压、溅射功率、溅射时间三种不同条件下制备 AZO 的 XRD 图。通过对比国际标准物质卡片,发现所有薄膜的图谱均与 ZnO 的六方结构十分匹配,在图中未发现 Al_2O_3 的衍射峰,说明掺杂 Al 没有改变 ZnO 的晶体结构,而是 Al 进入 ZnO 晶体间隙中或取代 ZnO 结构中 Zn 的位置,因此所制备的 AZO 薄膜均为六方纤锌矿构型。图 1(a)为功率 150 W,气压 0.25~1.3 Pa,溅射 30 min 下制备的薄膜 XRD 图谱,可以发现不同气压条件下的薄膜均只有一个峰,与标准 ZnO 衍射峰峰位为 34.42°的(002)晶面相吻合,并以(002)面择优取向,其结晶性随 Ar 气压增加先略微变好后变差,这是因为当工作压强太高时,靶材溅射出来的团簇粒子更容易与 Ar 离子发生碰撞,到达衬底时靶材粒子动能变低难以扩散,影响薄膜的附着力及退火后的结晶度。相反,在较低的气压下,溅射靶的粒子到达基底时有足够的能量扩散,薄膜退火后结晶性变好[11]。

功率为 50~250 W,气压为 0.25 Pa,控制溅射时间使膜厚在 120 nm(±5 nm)得到其 XRD 图谱,如图 1(b)所示。可以发现,当功率为 50 和 100 W

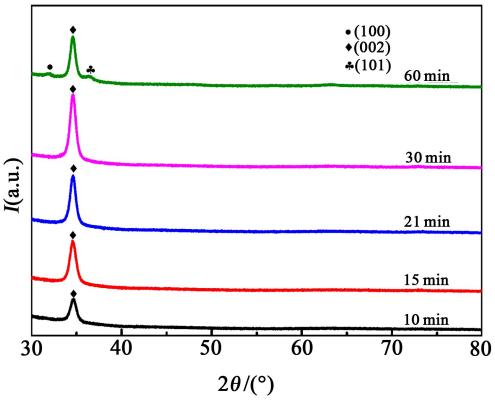
时，AZO 薄膜的结晶性极差，基本为非晶态，除了(002)峰，在峰位 31.78°与 36.26°处还出现小峰，分别对应 ZnO 六方纤锌矿的(100)和(101)晶面。随着功率的提高薄膜的结晶性迅速提高，并沿着(002)面择优生长。这是因为溅射功率进一步提高导致溅射粒子在薄膜表面的迁移率增加，粒子容易迁移到更合适的格点位置，这有助于薄膜晶粒在退火时成核生长，从而提高薄膜的结晶性；但当溅射功率增加至 250 W时，溅射粒子动能更大，高动能的粒子到达衬底时加大了对薄膜表面的轰击损伤[12]，可能会导致衬底和薄膜的缺陷增加。



(a)　不同气压



(b)　不同功率



(c)　不同时间

图 1　不同气压、溅射功率、溅射时间下制备 AZO 薄膜的 XRD 图谱

图 1(c)是在保持气压为 0.25 Pa，功率为 200 W，控制溅射时间下所得薄膜的 XRD 图谱。可以看出，随着溅射时间的增加，(002)面峰强度先增强后减弱，这可能是由于薄膜刚生长时与衬底石英玻璃之间结构不匹配，导致薄膜内应力过大，影响薄膜的结晶性。随着沉积薄膜的厚度增加，膜内应力减小，结晶性变好，(002)面取向增强[13]，但在 60 min 时出现(100)和(101)晶面，削弱了(002)面的取向性。通过分析不同沉积时间下 AZO 薄膜 XRD 图谱中的(002)峰(示于表 2)，由 Scherrer 公式可以得到晶粒大小：

$$D = K\lambda/\beta\cos\theta \tag{1}$$

其中，$K=0.89$，$\lambda=0.154\,056$ nm，β 为衍射峰的半高宽，θ 为衍射角。可以发现，随着沉积时间的增加，晶粒由 12.30 nm 缓慢增大到 15.58 nm，(002)面的峰位由 34.65°向左偏移至 34.57°，由以下布拉格方程可以计算晶面间距：

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{2}$$

式中，d 为晶面间距，θ 为衍射角，λ 为波长，n 为反射级数。因此，由表 2 可知，随溅射时间增长，AZO 薄膜晶面间距增大。由于 Al 掺杂 ZnO 时，当 Al 占据晶格中的 Zn 位置，生成 $Al_{Zn}^{\cdot}$ 缺陷，且 Al^{3+} 半径小于 Zn^{2+} 半径，会引起晶格收缩，晶面间距减小。以上 XRD 结果说明，如溅射时间较短，则在制备的 AZO 薄膜中，较易生成 $Al_{Zn}^{\cdot}$ 缺陷，这一结果由后面其较高的载流子浓度可得到进一步证明。

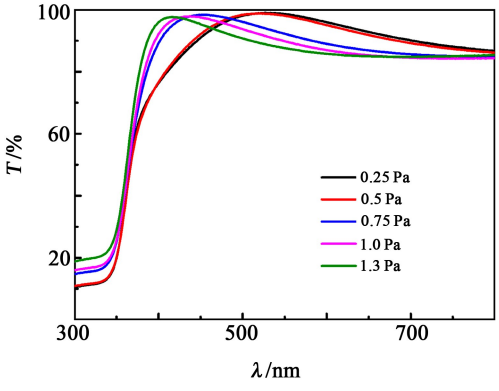
表 2　不同时间沉积 AZO 薄膜(002)面的 XRD 参数及晶粒大小

t/min	2θ/(°)	β/(°)	D/nm
10	34.65	0.669	12.30
15	34.61	0.650	12.66
21	34.59	0.647	12.72
30	34.58	0.603	13.64
60	34.57	0.528	15.58

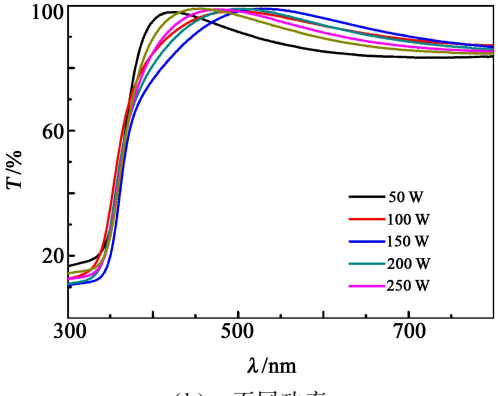
2.2　光电性能

图 2(a)～(c)为不同气压、功率、时间条件下沉积 AZO 薄膜在 300～800 nm 波长范围的光透过率，对应的可见光($\lambda=400$～700 nm)平均透过率如表 3～5 所示。表 3～5 分别为不同气压、功率和时间制备 AZO 薄膜的可见光平均透过率，可以发现所制备的所有 AZO 薄膜均具有良好的透过率，可见光平均透过率均在 86%以上。如表 3 所示，薄膜

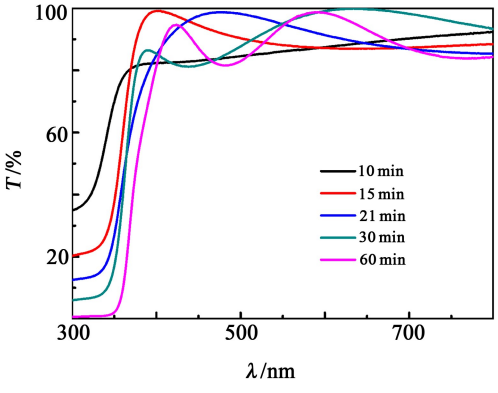
的平均可见光透过率随着气压的升高而逐渐降低；在气压为 1.3 Pa 时，平均可见光透过率降低至 89.2%，这可能是薄膜结晶性变差，使得晶粒变小，从而晶界变多，增加了对光的散射[14]，因此薄膜的透过率变差。表 4 中，AZO 薄膜透过率随着功率的提高先升高后降低，在功率为 100 W 时，达到最高，为 93.9%。表 5 中，薄膜的平均透过率随着沉积时间的增加，先升高再降低，可发现在沉积 10 min 时透过率低至 86%，其他溅射时间的平均透过率均在 90%以上，因为厚度较薄时薄膜结晶性较差，其晶界对可见光的散射大，可见光透过率较低；薄膜进一步



(a) 不同气压



(b) 不同功率



(c) 不同时间

图 2 不同沉积条件下的 AZO 薄膜的光透过率

表 3 不同气压下沉积的 AZO 薄膜在可见光范围的平均透过率

p/Pa	0.25	0.5	0.75	1.0	1.3
T/%	93.6	93.4	92.0	90.5	89.2

表 4 不同功率下沉积的 AZO 薄膜在可见光范围的平均透过率

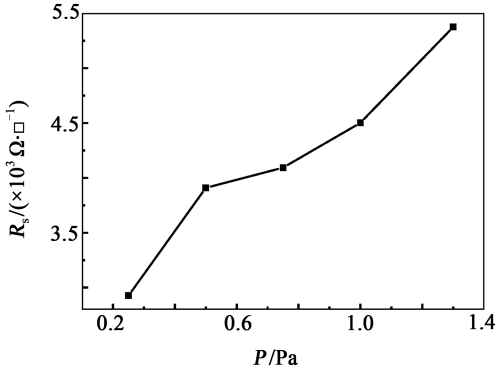
P/W	50	100	150	200	250
T/%	89.2	93.9	93.6	93.1	92.5

表 5 不同沉积时间下的 AZO 薄膜在可见光范围的平均透过率

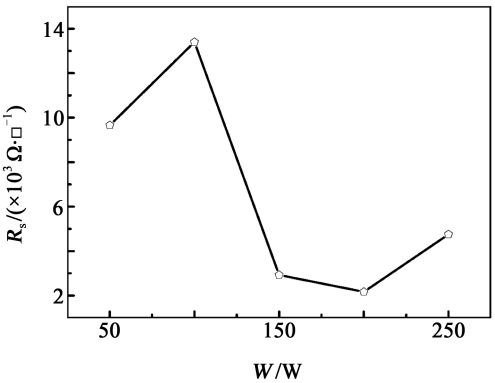
t/min	10	15	21	30	60
T/%	86.0	90.2	93.1	92.4	90.9

增厚，结晶性改善，晶界对可见光的散射降低，可见光透过率增加[15]；膜厚继续增加，会提高薄膜对光的吸收，从而降低透过率。

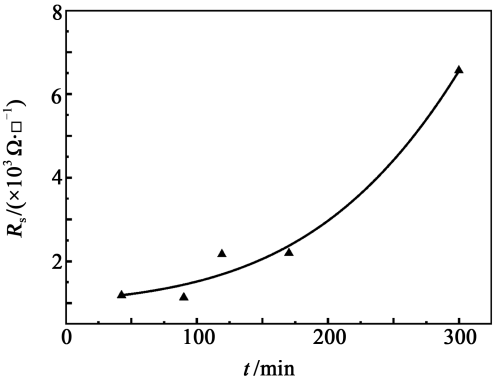
为了研究上述沉积条件与薄膜电学性能的关系，进一步测量了 AZO 薄膜的方阻。图 3(a)～(c)为不同气压、功率、时间条件下制备 AZO 薄膜的方阻图。如图 3(a)所示，可以看出工作气压为 0.25 Pa 时，薄膜方阻最低；随着工作气压的提高，薄膜方阻增大，这是因为当工作压强太高时，溅射粒子在衬底的迁移率降低，结晶变差使其方阻变高；相反在较低的气压下，溅射粒子到达基底时有足够的能量扩散，导致薄膜方阻降低，与 XRD 分析结果一致。不同溅射功率(50～250 W)下得到制备 AZO 薄膜的方阻如图 3(b)所示，可以看出，随着溅射功率的提高，薄膜的方阻先提高再快速降低再升高，在溅射功率为200W时薄膜方阻最低，降至 2 167.7 Ω/□，在图 1(b)中分析可知，在 150 W 处结晶性变好，所以方阻迅速降低，250 W 时可能是溅射功率过高薄膜缺陷增加，导致方阻上升。图 3(c)为 AZO 薄膜方阻随沉积时间的变化规律，可以看出，随着时间的增



(a) 气压



(b)　功率



(c)　时间

图 3　不同气压、功率、时间下的 AZO 薄膜的方阻

加，方阻增大，这可能是因为随溅射时间增加，薄膜结晶性提高，$Al_{Zn}^{\cdot}$ 缺陷浓度降低[16]。下面将从其载流子特性方面进一步深入讨论。

不同沉积时间下制备 AZO 薄膜的电阻率、载流子浓度及迁移率如图 4 所示，10 min 时 AZO 的载流子浓度最高为 $2.15\times10^{20}\ cm^{-3}$，由于 AZO 薄膜是 n 型半导体，Al 替代了 ZnO 中的 Zn 生成 $Al_{Zn}^{\cdot}$，其提供额外的载流子，表明此时薄膜中存在最高浓度的 $Al_{Zn}^{\cdot}$。溅射时间增加，晶体质量改善导致薄膜中 $Al_{Zn}^{\cdot}$ 缺陷浓度的降低[17]，因此随着沉积时

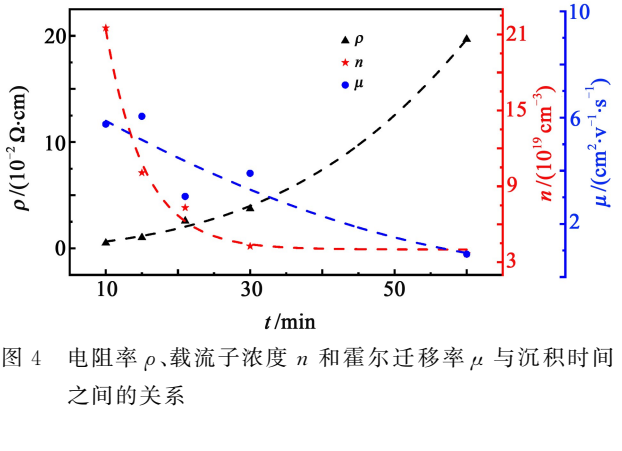


图 4　电阻率 ρ、载流子浓度 n 和霍尔迁移率 μ 与沉积时间之间的关系

间增加到 30 min，载流子浓度急剧下降至 $4.28\times10^{19}\ cm^{-3}$，而超过 30 min 载流子浓度趋于平缓，这与 XRD 分析一致。由表 2 知，不同溅射时间的晶粒大小相差不大。由上面分析可知，溅射时间增加，AZO 中的 $Al_{Zn}^{\cdot}$ 浓度变少，相对地在晶界处存在的间隙 Al 原子变多，晶界散射增加[18]，使载流子迁移率总体上降低，因此电阻率随溅射时间增加而增大。在沉积时间为 10 min 时，电阻率最低，为 $5.04\times10^{-3}\ \Omega\cdot cm$。

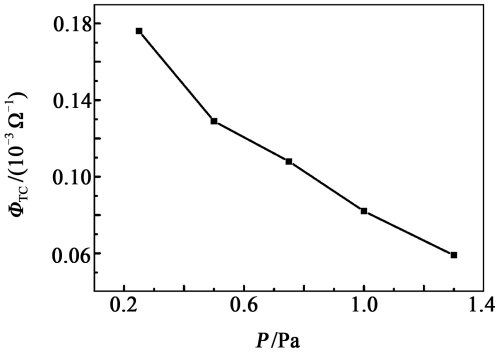
2.3　Haacke 性能指数分析

由上面的分析知，薄膜方阻随着气压升高而增大，其透过率随着气压升高而降低，可以判断出气压为 0.25 Pa 时薄膜的光电性能较佳，但薄膜方阻和透过率在沉积功率和时间变化时没有这种关系，不能作为优化 AZO 制备工艺的直接依据。因此为了表征所制备 AZO 薄膜的光电性能优劣，引入 Haacke 性能指数 Φ_{TC} 进行权衡分析：

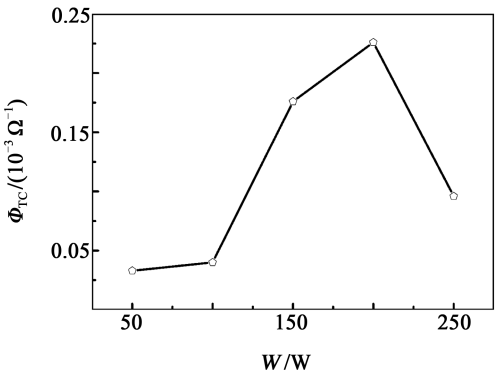
$$\Phi_{TC}=T^{10}/R_s \tag{3}$$

其中，T 表示可见光(波长在 400～700 nm)的平均透过率，R_s 为薄膜的方阻，Φ_{TC} 为性能指数。

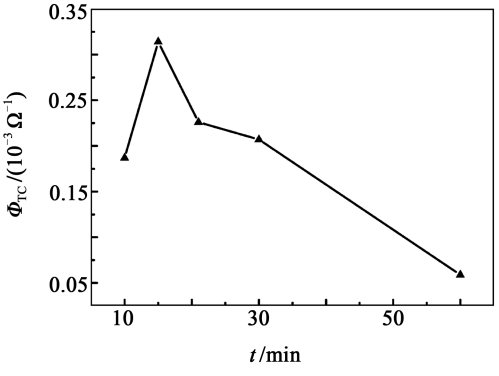
图 5 为不同气压、功率、时间下沉积的 AZO 薄膜的性能指数，图 5(a)中性能指数随着气压的升高而降低，在气压为 0.25 Pa 时最高。然后以工作气压为 0.25 Pa，改变功率，得到图 5(b)的性能指数，可以看出随着功率的增加，性能指数先提高后降低，在功率为 200 W 时达到最大值。以工作气压为 0.25 Pa，沉积功率为 200 W，控制沉积时间，得到 AZO 薄膜性能指数，如图 5(c)所示。可以发现随着沉积时间的增加，Haacke 性能指数先迅速提高后缓慢降低，在溅射时间为 15 min 时达到最高值，为 $0.314\times10^{-3}\ \Omega^{-1}$。由薄膜性能指数，可逐步优化出 AZO 薄膜的制备工艺条件，如当前较优工艺条件为功率 200 W，气压 0.25 Pa，溅射时间 15 min。不过，



(a)　不同气压



(b) 不同功率



(c) 不同时间

图 5 不同沉积条件下 AZO 薄膜的性能指数

最优工艺的获得还需在不同条件下进行大量深入全面的研究工作。

3 总结

通过控制磁控溅射工作气压、功率及沉积时间，在石英玻璃上成功沉积了 AZO 薄膜，研究了不同工艺条件对 AZO 薄膜微结构和光电性能的影响。XRD 结果表明所制备的所有 AZO 薄膜结构均为六方纤锌矿结构，大部分结晶性优良，且均具有明显的 c 轴取向；通过分析透过率可知，所有薄膜的可见光平均透过率均在 86% 以上，具有良好的透光性；工作气压和功率的变化都会影响溅射粒子在衬底的扩散能力进而影响薄膜的结晶性，随着工作气压的增加，薄膜的结晶性变差，薄膜方阻增大，随着溅射功率的提高，结晶性变好，使得薄膜方阻在 150 W 时急剧减小；随着溅射时间的增加，结晶性变好，阻碍了 $Al_{Zn}^{\cdot}$ 的形成，相应地在晶界处存在的间隙 Al 原子变多，载流子迁移率降低，导致薄膜电阻率提高。在工作气压为 0.25 Pa，功率为 200 W，溅射时间为 10 min 时，薄膜的电阻率最低，为 $5.04\times10^{-3}\ \Omega\cdot$cm。最佳 Haacke 性能指数($0.314\times10^{-3}\ \Omega^{-1}$)表明当前工作最优的工艺条件为工作气压 0.25 Pa，功率 200 W，溅射时间 15 min。

参考文献：

[1] Liu H, Avrutin V, Izyumskaya N, et al. Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices[J]. Superlattices and Microstructures, 2010, 48(5): 458-484.

[2] Afre R A, Sharma N, Sharon M, et al. Transparent conducting oxide films for various applications: A review[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2019, 53(1): 79-89.

[3] Ravichandran K, Begum N J, Sakthivel S S, et al. Properties of sprayed aluminum-doped zinc oxide films—A review[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(11): 1411-1423.

[4] Srinatha N, Raghu P, Mahesh H M, et al. Study on the effect of Ni co-doping on structural, micro-structural and optical properties of transparent AZO thin films [J]. Optical Materials, 2021, 113(3): 110872.

[5] Doggett B, Chakrabarti S, O'Haire R, et al. Electrical characterisation of phosphorus-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition[J]. Superlattices & Microstructures, 2007, 42(1-6): 74-78.

[6] Aydin C, El-Sadek M S A, Zheng K, et al. Synthesis, diffused reflectance and electrical properties of nanocrystalline Fe-doped ZnO via sol-gel calcination technique[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 447-452.

[7] Liu Y S, Lin Y S, Wei Y S, et al. Optical and electrical characterization of transparent conductive Gd-doped AZO thin films[J]. Physica Status Solidi, 2013, 210(3): 600-606.

[8] Dhungel S K. Properties of textured ZnO∶Al films prepared by RF magnetron sputtering for thin film solar cells[J]. J. Korean Physical Society, 2005, 47: S576-S580.

[9] Hla B, Xwa B, Mla B, et al. Influence of the target power on the microstructure and electrical properties of Al-doped ZnO thin films deposited at room temperature[J]. Ceramics Inter., 2020, 46(8): 11978-11987.

[10] Manzen I, Yoshimura Y, Matsubara K, et al. Improvement of characteristics of flexible Al-doped ZnO/Ag/Al-doped ZnO transparent conductive film using silver[J]. J. of Vacuum Science & Technol. B, 2020, 38(2): 022205.

[11] Liu C, He F, Yan N, et al. Influence of deposition pressure on properties of ZnO∶Al films fabricated by RF magnetron sputtering[J]. J. of Wuhan University of Technol. Mater. Sci. Ed., 2016, 31(6): 1235-1239.

[12] 史永胜，陈阳阳，宁青菊，等. 溅射功率对 AZO 透明导电薄膜的影响[J]. 材料导报，2011，25(6)：42-44.
Shi Yongsheng, Chen Yangyang, Ning Qingju, et al. Effect of sputtering power on AZO transparent conductive films[J]. Mater. Review, 2011, 25(6): 42-44.

(下转第 577 页)

[7] Milne W I, Teo K B K, Amaratunga G A J, et al. Carbon nanotubes as field emission sources[J]. J. of Materials Chemistry, 2004, 14: 933-943.

[8] 梅山孩，冯　涛，孙　卓，等. 电泳电压对碳纳米管沉积薄膜及阴极场发射特性影响[J]. 液晶与显示，2008，23(4)：478-482.
Mei Shanhai, Feng Tao, Sun Zhuo, et al. Effect of electrophoretic voltage on emission characteristics of carbon nanotubes deposited thin films and cathodes[J]. Chinese J. of Liquid Crystals and Displays, 2008, 23(4): 478-482.

[9] Chung S J, Moon J H, Park K C, et al. Field emission properties of the globe-like diamond microcrystalline aggregate films grown by MPCVD[J]. Appl. Phys., 1997, 4047: 82-86.

[10] Zhu W, Konchanski G P, Jin S, et al. Electron field emission properties of diamond[J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 1157: 67-72.

[11] 刘巧平，李伟霞，杨延宁，等. 钛基底的纳米金刚石掺混纳米碳管的场发射特性[J]. 发光学报，2015，36(9)：1013-1017.
Liu Qiaoping, Li Weixia, Yang Yanning, et al. Field emission characteristics of carbon nanotubes doped with nano-diamond on titanium substrate[J]. Chinese J. of Luminescence, 2015, 36(9): 1013-1017.

[12] 薛增泉，吴全德. 电子发射与电子能谱[M]. 北京：北京大学出版社，1993：60-89.
Xue Zengquan, Wu Quande. Electron Emission and Electron Energy Spectrum[M]. Beijing: Peking University Press, 1993: 60-89.

[13] 高金海，张武勤，张兵临. 类球状微米金刚石聚晶膜场发射的稳定性[J]. 发光学报，2009，30(6)：872-875.
Gao Jinhai, Zhang Wuqin, Zhang Binglin. Field emission stability of spherical micron-like diamond polycrystalline films [J]. Chinese J. of Luminescence, 2009, 30(6): 872-875.

[14] Kiyota H, Higashi M, Kurosu T, et al. et al. Field emission from amorphous carbon films grown by electrochemical deposition using methanol liquid[J]. J. of Appl. Phys., 2006, 99(9): 094903-094903-6.

[15] 高金海，张　兰，姚　宁，等. 金刚石微米聚晶结构的生长及其场发射特性研究[J]. 功能材料，2017，38(9)：1447-1449.
Gao Jinhai, Zhang Lan, Yao Ning, et al. Study on field emission properties of diamond micron polycrystalline structure [J]. Functional Materials, 2017, 38(9): 1447-1449.

[16] 高金海，李成刚，张　洁，等. 金刚石聚晶碳膜场发射的增强特性研究[J]. 半导体光电，2019，40(5)：671-674.
Gao Jinhai, Li Chenggang, Zhang Jie, et al. Field emission enhancement of diamond polycrystalline carbon film [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 671-674.

作者简介：

高金海(1970—)，男，博士，副教授，从事阴极场电子发射的研究。

(上接第 566 页)

[13] Dong B Z, Fang G J, Wang J F, et al. Effect of thickness on structural, electrical, and optical properties of ZnO∶Al films deposited by pulsed laser deposition[J]. J. of Appl. Phys., 2007, 101(3): 041301.

[14] 付恩刚，庄大明，张　弓，等. 工作气压对磁控溅射 ZAO 薄膜性能的影响[J]. 功能材料，2003，34(5)：543-545.
Fu Engang, Zhuang Daming, Zhang Gong, et al. Effect of working air pressure on properties of magnetron sputtering ZAO thin films[J]. J. of Functional Materials, 2003, 34(5): 543-545.

[15] 范丽琴. 薄膜厚度对 AZO 薄膜光电性能的影响[J]. 陶瓷学报，2015，36(1)：23-26.
Fan Liqin. Effect of film thickness on the photoelectric properties of AZO films[J]. J. of Ceramics, 2015, 36(1): 23-26.

[16] Necib K, Touam T, Chelouche A, et al. Investigation of the effects of thickness on physical properties of AZO sol-gel films for photonic device applications[J]. J. of Alloys & Compounds, 2017, 735: 2236-2246.

[17] Myoung J M, Wook-Hi Yoon, Lee D H, et al. Effects of thickness variation on properties of ZnO thin films grown by pulsed laser deposition[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2002, 41(1): 28-31.

[18] Li Q, Mao W, Zhou Y, et al. Defects evolution and their impacts on conductivity of indium tin oxide thin films upon thermal treatment[J]. J. of Appl. Phys., 2015, 118(2): 1736.

作者简介：

莫敏静(1997—)，女，硕士研究生，研究方向为半导体薄膜与器件；

何春清(1973—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为凝聚态物理及核技术应用。