材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021061602

双靶共溅射制备 AZO 薄膜的光电性能研究

冯媛媛，邓　军*，许晓芳，贺　鑫，宋　钊

（北京工业大学 信息学部 光电子技术教育部重点实验室，北京 100124）

摘　要： 采用双靶共溅射的方法制备了光电性能较好的掺 Al 氧化锌(AZO)薄膜，利用 X 射线衍射仪、霍尔测试仪、SEM 等多种技术手段研究了不同的 Al 溅射功率和快速退火条件对 AZO 薄膜的影响，发现 AZO 薄膜在 Al 溅射功率为 15 W、退火温度为 400 ℃时性能最佳。当 Al 溅射功率为 15 W 时，其电阻率最低为 6.552×10^{-4} Ω·cm，可见光波段(400～700 nm)平均透过率超过 92%。随着 Al 溅射功率的增大，可见光波段的透过率逐渐减小，红外波段(2.5～20 μm)的透过率逐渐增大，最大为 40%。

关键词： AZO 薄膜；双靶共溅射；Al 溅射功率；快速退火；红外

中图分类号： TB383.2；TM914.4　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0656－06

Study on Optical and Electrical Properties of AZO Films Prepared by Co-sputtering with Two Targets

FENG Yuanyuan, DENG Jun, XU Xiaofang, HE Xin, SONG Zhao

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Ministry of Education, Faculty of Information, Beijing University of Technology, Beijing 100124, CHN)

Abstract: In this paper, Al-doped ZnO (AZO) films with better photoelectric properties were prepared by the dual-target co-sputtering method. Various technical methods such as X-ray diffractometer, Hall tester and SEM were used to study the influence of different Al sputtering power and rapid annealing conditions on the performance of AZO film. It is found that the AZO films present the best performance when the Al sputtering power is 15 W and the annealing temperature is 400 ℃. When the Al sputtering power is 15 W, its lowest resistivity is 6.552×10^{-4} Ω·cm, and the average transmittance in the visible light band (400～700 nm) exceeds 92%. With the increase of Al sputtering power, the transmittance in the visible light band gradually decreases, while the transmittance in the infrared band (2.5～20 μm) gradually increases, and the maximum value reaches 40%.

Key words: AZO film; dual target co-sputtering; Al sputtering power; rapid annealing; infrared

0　引言

透明导电氧化物材料因在太阳电池[1-3]、光纤传感器[4]、发光二极管[5-6]等光电器件的应用中表现出较好的光电特性，而得到国内外研究者们的广泛研究。常见的透明导电氧化物材料主要有氧化铟锡(ITO)和掺 Al 的氧化锌(AZO)材料，两者在导电性和透光性上均表现出较好的性能，但由于铟元素储量稀少、价格昂贵，且具有一定的毒性，更多人选择用 AZO 材料代替 ITO 材料。

作为光电器件中导电的光学窗口材料，目前的研究结果显示 AZO 薄膜在可见光区域内的透光率能达到 85%左右，电阻率一般在 10^{-3} Ω·cm[7-9]。此外，在贵金属和透明导电氧化物材料中，AZO 薄膜材料的损耗较低，可以实现等离子体增强[10]，这极大地拓宽了 AZO 材料的应用领域。

收稿日期：2021－06－16.

*通信作者：邓　军

迄今为止已经发展出多种制备 AZO 薄膜的先进技术，如喷雾热解法[11]、化学气相沉积[12]、磁控溅射法[13]、脉冲激光沉积[14]和溶胶-凝胶法[15]等。相比于其他制备方法，磁控溅射法制备 AZO 薄膜具有组分控制灵活，易于实现大面积、均匀的薄膜材料，工艺简单，成本低等优点，因而被广泛采用。张涛[16]采用双靶交替溅射 ZnO 和 Al 的方法制备 AZO 薄膜并对其光学和电学特性进行研究。但双靶交替溅射制备 AZO 薄膜增加了薄膜制备不均匀的概率。赵笑昆[17]、吴跃波等[18]采用固定质量分数氧化铝掺杂的 AZO 陶瓷靶进行磁控溅射，其不能灵活控制掺杂浓度。何双赐等[19]报道了采用双靶共(同时)溅射方法制备的 AZO 薄膜，电阻率同样达到 10^{-3} Ω·cm 级别。本实验在双靶共溅射的基础上，通过优化工艺参数，在不影响可见光透过率的条件下，制备出了电阻率更低的 AZO 薄膜，研究了不同工艺条件对 AZO 薄膜光电特性的影响。此外，对 AZO 薄膜在红外波段(2.5～20 μm)的光学性质也进行了研究。

1　实验

1.1　实验设计

本实验利用 MSP-3200 全自动磁控溅射镀膜机，分别对高纯 ZnO 靶材和 Al 靶材施加射频和直流功率，实现在玻璃基片和 GaAs 衬底上的共溅射。选择玻璃基片是为了研究 AZO 薄膜在可见光波段的透射特性，选择 GaAs 衬底是为了便于研究 AZO 薄膜在红外波段的特性。在溅射之前，按照丙酮、无水乙醇煮沸，去离子水冲洗的顺序对两种基片表面进行清洗，去除表面杂质，氮气枪吹干后立即放入溅射系统进样室。在正式的溅射过程中，抽本底真空到 3×10^{-4} Pa，溅射气体为氩气。实验中，ZnO 靶的溅射功率固定为 250 W，Al 靶的溅射功率分别为 10，15，20，25，30 W，进行共溅射制备 AZO 薄膜。此外还对 Al 靶溅射功率为 20 W 的 AZO 薄膜样品单独进行了不同温度下的退火实验，退火温度分别为 300，350，400，450，500 ℃，观察不同工艺条件下 AZO 薄膜光学和电学特性的变化。

1.2　薄膜性能的表征

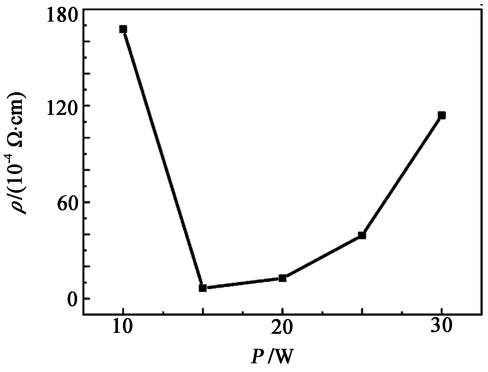
实验中，采用 SEM(GeminiSEM 300)观察薄膜的表面形貌，用 X 射线衍射仪(D8 ADVANCE)分析薄膜的晶体结构，用霍尔测试仪测得薄膜的电阻率，用紫外-可见光分光光度计和傅里叶红外光谱仪(FTIR)分别测得薄膜在可见光(400～700 nm)和红外波段(2.5～20 μm)的透过率，用 EDS 能谱定量分析薄膜的元素。

2　实验结果与讨论

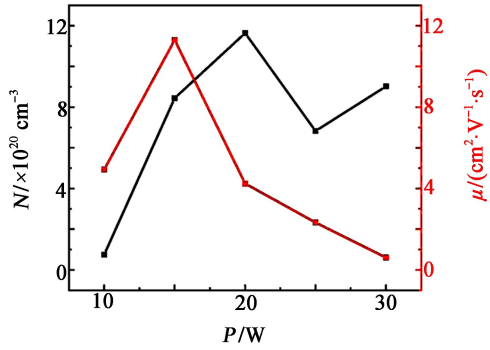
2.1　电学特性

2.1.1　Al 靶溅射功率对薄膜特性的影响

AZO 薄膜是对 ZnO 薄膜进行铝掺杂得到的薄膜。正三价铝离子替换正二价锌离子，与周围的原子形成共价键。铝离子比锌离子多出来的一个价电子会变成自由电子，使薄膜的导电性增强[20]，因此铝掺杂对于 AZO 薄膜的导电性能有直接的影响。图 1(a)是霍尔测试仪测得的在不同 Al 溅射功率下 AZO 薄膜的电阻率(ρ)变化曲线。由图可见，随着溅射功率的增加，AZO 薄膜电阻率先减小后增大，其中，在 10～15 W 范围内电阻率急剧减小。图 1(b)示出不同 Al 溅射功率下，薄膜的迁移率(μ)和载流子浓度(N)的变化情况。



(a)　电阻率



(b)　载流子浓度、迁移率

图 1　AZO 薄膜在不同的 Al 溅射功率下的电阻率、载流子浓度和迁移率变化曲线

表 1 的 EDS 能谱数据显示，当 Al 溅射功率为 10 W 时，薄膜中未能探测到 Al 元素。当溅射功率为 15 W 时，薄膜中 Al 元素掺杂量 w(Al)＝

1.07%，结合图 1(a)中溅射功率从 10～15 W 电阻率急剧减小的曲线，表明 Al 元素的加入能够显著增强薄膜的导电性，且电阻率在 15 W 时达到最低，为 6.552×10^{-4} Ω·cm。同时，薄膜中的自由载流子浓度上升，迁移率上升(见图 1(b))。随着溅射功率的进一步增加，薄膜电阻率开始增加，迁移率开始下降。分析认为，随着溅射功率的增加，从靶材上轰击出来的 Al 原子数量增加，更多的 Al 原子替换 Zn 原子，形成更多的自由电子，导致载流子数增加。但随着溅射功率的进一步增大，溅射出的 Al 更多地以原子团的形式存在，Al 原子团不能很好地替代 Zn 原子，而是存在于晶粒间隙中，这会导致晶粒散射越来越大，并引起迁移率的降低[21]。

表 1 不同溅射功率下的元素含量

元素	Al 溅射功率/W			
w(Al)/%	10	15	20	25
C	1.15	0.94	0.97	0.88
O	18.59	18.74	19.09	18.51
Al	0	1.07	2.00	3.09
Zn	80.26	79.26	77.94	77.53

Al 原子作为一种掺杂原子，在进行掺杂的同时也会带来大量的晶格缺陷[22]，图 2 的 XRD 测试结果显示了不同 Al 溅射功率下，AZO 薄膜的晶体结构质量。由图可见，Al 溅射功率分别为 15，20 和 25 W 时，Al 原子的掺杂并未改变 ZnO 的晶体结构，还是趋向于(002)面生长，表 2 给出了不同 Al 溅射功率条件下，材料的(002)峰与(101)峰的强度比值，比值越大说明晶格的畸变越小，但在溅射功率为 30 W 时，XRD 曲线显示(002)面的峰已基本消失，这说明过量的 Al 掺杂导致氧化锌的晶体结构发生较为严重的畸变。

此外，XRD 的结果显示 Al 溅射功率为 15 W 时表现出很强的(002)峰，并且半峰全宽从 10 W 时的

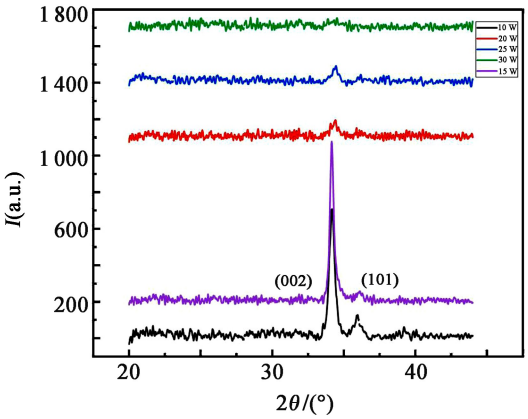


图 2 AZO 薄膜在不同的 Al 溅射功率下的 XRD 图

0.452 7 减小到 0.295 2。由式(1)的 Scherrer 公式[23]可知，薄膜的晶粒尺寸 D 反比于半峰全宽 B。

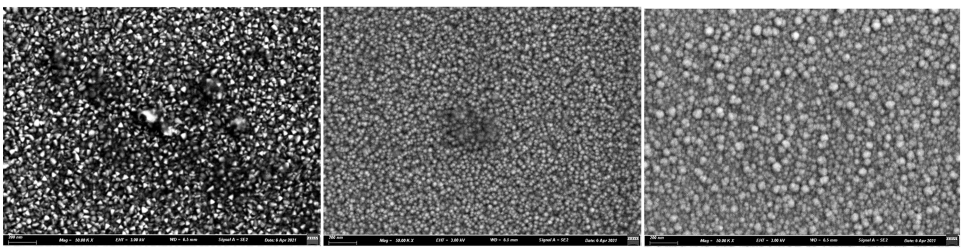
$$D=\frac{0.9\lambda}{B\cos\theta} \tag{1}$$

式中，λ 是 X 射线的波长(0.150 6 nm)。半峰全宽减小表明薄膜中的晶粒尺寸是增大的，晶粒尺寸的增大会导致晶粒之间的界面减少，表面粗糙度降低[24]，结晶质量变好。

表 2 (002)面和(101)面峰强比

峰强比	Al 溅射功率/W				
	10	15	20	25	30
$I_{(002)}/I_{(101)}$	5.54	15.05	2.35	3.05	太弱

图 3 为 ZnO 薄膜在不同 Al 掺杂条件下的 SEM 形貌图。结果显示，适量的 Al 掺杂不会引起 AZO 薄膜表面粗糙度增加，大量的 Al 掺入会导致薄膜表面颗粒增大。一个原因是大功率溅射产生的 Al 原子团大量存在于晶粒间隙，导致薄膜粗糙度增加，另一个原因可能是实验采用室温溅射，表面低温不利于间隙位置的 Al 原子迁移到 Zn 原子的位置上形成替位，所以溅射功率增大，晶体质量变差[25]。



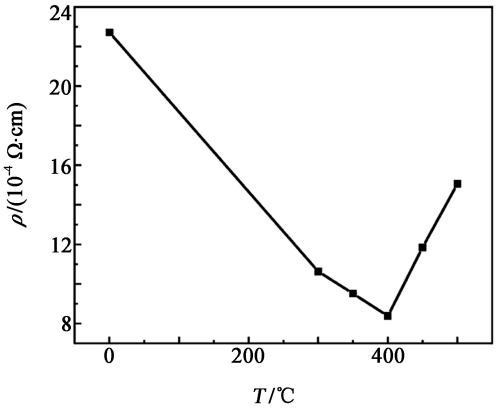
(a) 未掺杂 (b) w(Al)=1% (c) w(Al)=3%

图 3 AZO 薄膜在不同的 Al 掺杂浓度下的 SEM 图片

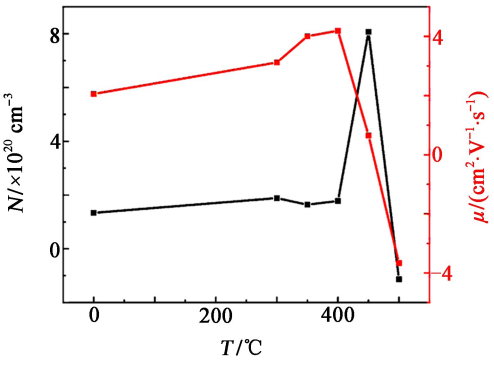
2.1.2 退火温度对薄膜特性的影响

为了研究退火温度对 AZO 薄膜材料特性的影响，在氩气环境下利用快速退火炉对 Al 溅射功率为 20 W 时的薄膜样品进行了不同温度的退火实

验。退火温度分别为 300，350，400，450 和 500 ℃。图 4(a)为不同退火温度下 AZO 薄膜的电阻率变化曲线。可以看出，退火后 AZO 薄膜的电阻率随着退火温度的增加，先明显减小后逐渐增大，400 ℃时达到最低。图 4(b)为退火后 AZO 薄膜的载流子浓度和迁移率的变化情况。表 3 为不同退火温度下，AZO 薄膜材料的(002)与(101)峰的比值。结果显示，退火温度为 400 ℃时，薄膜的晶体结构质量最好。



(a)　电阻率



(b)　载流子浓度、迁移率

图 4　AZO 薄膜在不同退火条件下的电阻率、载流子浓度和迁移率变化曲线

表 3　不同温度下(002)面和(101)面的峰强比

峰强比	退火温度/℃				
	300	350	400	450	500
$I_{(002)}/I_{(101)}$	7.02	5.47	15.07	6.98	8.24

图 5 的 XRD 曲线显示，随着退火温度的增加，AZO 材料(002)面的峰值强度逐渐增大，退火温度为 400 ℃时达到最大。较高的退火温度会促使薄膜中间隙原子的减少，多晶结构趋向单晶化，提高了结晶质量，进而使得材料的迁移率增大[26]。多次实验表明，当退火温度达到 500 ℃时，薄膜材料的导电类型会发生反型。有相关文献[27]提出，氧化锌导电类型发生转换的原因可能是在工艺过程中意外地掺入了某些杂质，但其真正的原因仍在探索中。(002)峰强显示，即使 AZO 材料导电类型发生改变，AZO 薄膜在 500 ℃下的结晶质量也并未受到影响。

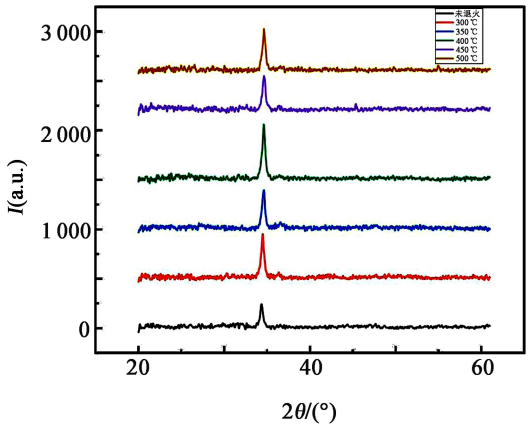


图 5　AZO 薄膜在不同退火条件下的 XRD 图

2.2　光学特性

ZnO 是一种宽禁带半导体，其带隙大于可见光光子能量，所以在可见光范围内基本上是透明的[20]。在 ZnO 薄膜中掺入 Al 元素形成 AZO 薄膜，其光学特性会发生变化。图 6 是采用不同的 Al 溅射功率制备的 AZO 薄膜可见光光谱透过率曲线。在 400～700 nm 波长范围内，Al 溅射功率为 10 和 15 W 时得到的 AZO 薄膜的平均透过率分别为 95.52%和 92.47%，随着 Al 溅射功率的增大，Al 掺入量增大，形成的 AZO 薄膜在可见光部分的透过率开始逐渐下降。分析认为可能的原因是可见光的透过受到 AZO 薄膜晶体质量的直接影响，大量 Al 原子团的存在，使 AZO 薄膜多晶化，晶界增加，晶格缺陷增大，可见光受晶界的散射加剧，导致可见光的透过率逐渐降低。

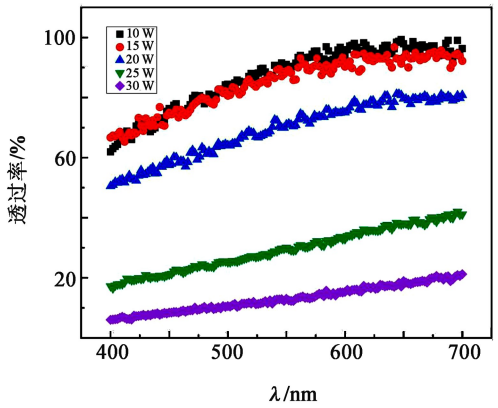


图 6　AZO 薄膜在不同 Al 溅射功率下的可见光透过率曲线

图 7 是利用傅里叶红外光谱仪(FTIR)测得的上述 AZO 薄膜在 2.5～20 μm(波数为 4 000～500 cm^{-1})范围内的透过率曲线。随着 Al 溅射功率的增大,AZO 薄膜的红外透过率逐渐增大。从图 1(a)中可以看出,随着 Al 溅射功率的增大,薄膜电阻率逐渐增大,我们可以简单地把它解释为红外区的高阻-低反射-高透射现象[22]。

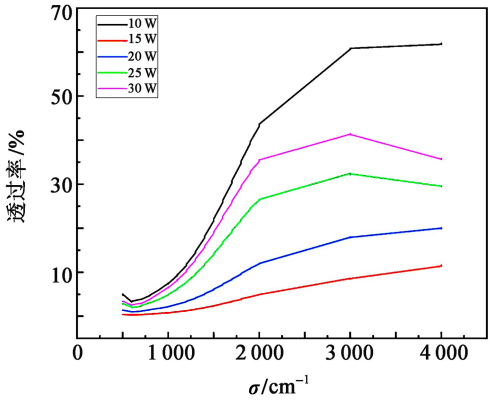


图 7 AZO 薄膜在不同 Al 溅射功率下的红外透过率曲线

材料的反射率会随着入射电磁波频率的变化而变化,但当入射电磁波的频率为等离子体频率 ω_p(即材料介电常数的实部为零)时,材料的反射率会发生突变[28],材料本身的性质也会发生改变。根据 Drude 模型[22],该条件下入射光波长为截止波长 λ_p:

$$\lambda_p = 2\pi c\left(\frac{\varepsilon_\infty \varepsilon_0 m^*}{ne^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

当入射光波长小于 λ_p 时,薄膜出现高透射现象;反之薄膜出现高反射现象。而透明氧化物材料的等离子体波长一般出现在红外区域[28],表明透明导电氧化物材料会在红外区域发生高反射。在高反射的红外波段,透明导电氧化物材料的反射系数近似为[22]

$$r = 1 - \frac{4\varepsilon_0 c}{eNd\mu} = 1 - 4\varepsilon_0 c R_{sheet} \tag{3}$$

其中,R_{sheet} 为方块电阻,μ 为迁移率,ε_0 为真空介电常数,N 为自由载流子浓度。由式(3)可知,当薄膜的方块电阻逐渐增大时,在红外波段下的反射率降低,再由反射率 r 和透过率 t 的关系:$r+t=1$ 可知,红外波段下的透过率会增大。方块电阻与电阻率 ρ 在薄膜厚度 d 一定时成正比关系:

$$R_{sheet} = \frac{\rho}{d} \tag{4}$$

本实验中,测试的薄膜厚度都控制在 150 nm 左右。因此,在红外区域内随着 Al 溅射功率的增加,材料电阻率增大,方块电阻增大,进而使材料反射系数减小,透过率增大。图 7 显示,在红外波段下,制备的 AZO 薄膜透过率在 Al 溅射功率为 30 W、波数为 3 000 cm^{-1} 时达到最大值 40%。

3 结论

本文采用双靶共溅射的方式制备了 AZO 薄膜,研究了不同 Al 溅射功率和不同退火温度对 AZO 薄膜光电特性的影响。在 Al 溅射功率为 15 W、退火温度为 400 ℃的工艺条件下得到了质量较好的 AZO 薄膜。随着 Al 溅射功率的增加,AZO 薄膜的电阻率先减小后增大,在 15 W 时,电阻率最低为 6.552×10^{-4} Ω·cm,可见光透过率达到 92.47%,当退火温度为 400 ℃时,结晶质量和导电性最好。另外,我们发现在退火温度达到 500 ℃时,AZO 薄膜的导电类型会出现反型,具体原因还有待讨论和探索。在 AZO 薄膜的光学特性研究中,发现随着 Al 溅射功率的增大,可见光波段透过率逐渐减小,红外波段透过率逐渐增大。

参考文献:

[1] Kuramochi H, Akiike R, Iigusa H, et al. Development of novel aluminum-doped zinc oxide film and its application to solar cells[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2011, 51(10): 003019-003021.

[2] Chu J B, Zhu H B, Xu X B, et al. RF magnetron sputtered indium tin oxide thin films for application in solar cells[C]// Proc. of IEEE Inter. Nanoelectronics Conf., 2008: 728-731.

[3] Tvarozek V, Sutta P, Novotny I, et al. Preparation of transparent conductive AZO thin films for solar cells[C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Adv. Semiconductor Devices & Microsystems, 2008: 275-278.

[4] Zamarreo C R, Hernaez M, Matias I R, et al. Resonance based optical fiber sensors by means of transparent conductive oxide coatings[C]// Proc. of IEEE Sensors, 2009: 151-153.

[5] Hsu C H, Chen S Y, Chen W C, et al. Study of a GaN-based LED with an Al/AZO composite transparent conductive layer [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, PP(9): 1-5.

[6] Lin J, Pei Y, Yi Z, et al. AlGaInP-based LEDs with Al-doped ZnO transparent conductive layer grown by MOCVD [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 64(9): 3678-3682.

[7] Laghfour Z, Ajjammouri T, Aazou S, et al. Structural and opto-electrical properties of Al doped ZnO sputtered thin films [J]. J. of Materials Science Materials in Electronics, 2015, 26(9): 1-6.

[8] Ayinde S A, Fasakin O, Olofinjana B, et al. Optical, structural and electrical properties of aluminum doped zinc oxide thin films by MOCVD technique[J]. J. of Electronic Materials, 2019, 48(6): 3655-3661.

[9] Sharmin A, Tabassum S, Bashar M S, et al. Depositions and characterization of sol-gel processed Al-doped ZnO (AZO) as transparent conducting oxide (TCO) for solar cell application [J]. J. of Theoretical and Appl. Phys., 2019, 13: 123-132.

[10] Masouleh F F, Sinno I, Buckley R G, et al. Characterization of conductive Al-doped ZnO thin films for plasmonic applications[J]. Appl. Phys. A, 2018, 124(2): 174.

[11] Sahal M, Sersar R, Mari B. Preparation of intrinsic and Al-doped ZnO thin layers by spray pyrolysis[C]// Proc. of 2016 Inter. Renewable and Sustainable Energy Conf. (IRSEC), 2016: 252-256.

[12] Najim S A, Al-Karem A, Muhammed M, et al. The effect of Al doping on structure and optical properties of ZnO thin films[C]// 2020 IEEE 10th Inter. Conf. Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), 2020: 01NP04-1-01NP04-4.

[13] Huang J, Tan R, Zhang Y, et al. Effects of substrate temperatures on the thermal stability of Al-doped ZnO thin films grown by DC magnetron sputtering[J]. J. of Materials Science Materials in Electronics, 2011, 23(2): 356-360.

[14] Kang S J, Yang H J. Optical and hall properties of Al-doped ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition with various substrate temperatures[J]. J. of Materials Science Materials in Electronics, 2013, 24(6): 1863-1868.

[15] Ma H L, Zhang D H, Chen Y P, et al. Large scale fluorine doped textured transparent conducting SnO_2 films deposited by atmospheric pressure chemical vapour deposition[J]. Thin Solid Films, 1997, 298(2): 151-155.

[16] 张　涛. 磁控溅射法制备 ZnO 薄膜与 Al 掺杂 ZnO(AZO)薄膜及其性能研究[D]. 成都：四川师范大学，2014.
Zhang Tao. The study on characteristics of ZnO thin films and Al-doped zinc oxide(AZO) thin film prepared by magnetron sputtering[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014.

[17] 赵笑昆，李博研，冯　波. Ar 流量对磁控溅射制备 Al 掺杂 ZnO 薄膜的影响[J]. 真空与低温，2021，27(1)：32-37.
Zhao Xiaokun, Li Boyan, Feng Bo. Influence of Ar flow rate on Al-doped ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering [J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(1): 32-37.

[18] 吴跃波，罗敏雪，雷　声. 磁控溅射功率对掺 Al 氧化锌薄膜特性的影响[J]. 传感器与微系统，2011，30(6)：36-38.
Wu Yuebo, Luo Minxue, Lei Sheng. Effect of sputtering power on the properties of Al-doped ZnO films by RF magnetron sputtering [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(6): 36-38.

[19] 何双赐，钟志成，魏彦锋. 共溅射法制备 AZO 薄膜及其光电性能的研究[J]. 表面技术，2018，47(5)：233-238.
He Shuangci, Zhong Zhicheng, Wei Yanfeng. Preparation and opto-electrical properties of co-sputtered AZO thin films[J]. Surface Technology, 2018, 47(5): 233-238.

[20] 陈小伟. 靶基距、溅射角及退火对 AZO 薄膜光电性能影响[D]. 南宁：广西大学，2017.
Chen Xiaowei. Influence of the photoelectric properties of AZO thin films by the target-substrate distance, sputtering angel and annealing[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.

[21] 于　芬. 铝原子掺杂氧化锌薄膜的制备与性能[D]. 烟台：鲁东大学，2007.
Yu Fen. The preparation and property study of the Al-atom-doped ZnO thin films[D]. Yantai: LuDong University, 2007.

[22] 穆慧慧. 铝掺杂量对氧化锌薄膜光电性能的影响[D]. 郑州：郑州大学，2010.
Mu Huihui. Effects of aluminum doping content on the optical and electrical properties of ZnO thin films[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.

[23] Alexander Elbert L. X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials[M]. John Wiley & Sons, Inc. J. of the American Chemical Society, 1974: 2030-2031.

[24] 王　阳. AZO 透明导电薄膜及其用于 GaAs 基 VCSEL 的研究[D]. 北京：北京工业大学，2019.
Wang Yang. Investigation on AZO thin films and its application to GaAs based VCSEL [D]. Beijing: Beijing University of Technol., 2019.

[25] 孟凡平. 低温磁控溅射制备高性能 AZO 薄膜研究[D]. 宁波：中国科学院宁波材料技术与工程研究所，2016.
Meng Fanping. Preparation of high quality AZO films by magnetron sputtering without external substrate heating[D]. Ningbo: Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2016.

[26] Chen T H, Cheng T C, Hu Z R. The electrical and optical properties of AZO thin film under different post-annealing temperatures[J]. Microsystem Technologies, 2013, 19(11): 1787-1790.

[27] Janotti A, Van D. Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor[J]. Reports on Progress in Physics, 2009, 72(12): 126501.

[28] 马宝全. 透明的高导电近红外反射 ZnO：Ga 薄膜的制备及特性研究[D]. 杭州：浙江大学，2007.
Ma Baoquan. Investigations on the preparation and properties of highly transparent conductive and near-IR reflective ZnO：Ga films[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

作者简介：

冯媛媛(1997—)，女，河南信阳人，硕士研究生，主要从事半导体光电材料与器件制备的研究；

邓　军(1969—)，男，北京人，博士，副研究员，硕士生导师，主从事光电探测器件与材料外延制备的研究工作。