

脉冲激光沉积法制备低阻掺镓氧化锌薄膜及其光电性能

莫观孔, 刘家辉, 邹卓良, 唐子媚, 刘宇伦, 何欢, 符跃春, 沈晓明*

广西大学资源环境与材料学院, 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西南宁 530004

摘要 采用脉冲激光沉积法在玻璃衬底上沉积掺镓氧化锌(GZO)透明导电薄膜,使用 X 射线衍射仪、紫外可见分光光度仪、原子力电子显微镜和霍尔测试系统,研究了氧气分压对 GZO 薄膜晶体结构、微观形貌以及光电性能的影响。结果表明:所有的样品都表现出六方纤锌矿结构,并具有高度的 c 轴择优取向生长;薄膜表面致密光滑,晶粒尺寸随氧气分压增大而先增大后减小,当氧气分压为 0.5 Pa 时,薄膜的结晶性最佳;沉积的 GZO 薄膜在可见光区域表现出高于 91.97% 的透过率,且禁带宽度在 3.492~3.576 eV 之间;随着氧气分压增大,载流子浓度与霍尔迁移率先增加后减小,电阻率先减小后增大,当氧气分压为 0.5 Pa 时,GZO 薄膜的电阻率最低,为 $2.95 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

关键词 薄膜; 脉冲激光沉积法; 氧气分压; 掺镓氧化锌薄膜; 光学性质; 电学性能

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1003001

Preparation of Low-Resistivity GZO Thin Films Using Pulsed Laser Deposition and Investigation of Optoelectronic Properties

Mo Guankong, Liu Jiahui, Zou Zhuoliang, Tang Zimei, Liu Yulun, He Huan, Fu Yuechun, Shen Xiaoming*

School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Guangxi Key Laboratory of Processing for Non-Ferrous Metals and Featured Materials, Nanning, Guangxi 530004, China

Abstract Ga-doped ZnO (GZO) transparent conductive thin films are deposited on glass substrates via the pulsed laser deposition method; further, the influence of oxygen pressure on the structure, surface morphology, and photoelectric properties of the GZO thin film is systematically investigated using X-ray diffractometer, ultraviolet-visible spectroscopy, atomic force microscopy, and Hall test system. Results show that all the samples exhibit a hexagonal wurtzite structure with a preferred orientation along the c -axis. Homogeneous, dense, and compact surfaces are obtained for all the GZO films. The crystal size initially increases and then decreases with the increasing oxygen pressure; optimum crystallinity is observed at an oxygen pressure of 0.5 Pa. The prepared GZO films exhibit a transmittance higher than 91.97% in the visible region; the band gap of the GZO film is 3.492-3.576 eV. The carrier density and Hall mobility initially increase and then decrease with the increasing oxygen pressure. The resistivity initially decreases when the oxygen pressure increases. However, with a further increase in the oxygen pressure, the resistivity increases. The minimum resistivity of $2.95 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ is observed when the oxygen pressure is 0.5 Pa.

Key words thin films; pulsed laser deposition method; oxygen pressure; Ga-doped ZnO thin films; optical properties; electric properties

OCIS codes 260.5150; 310.1860; 310.3840; 160.6000

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-05-23; 录用日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61474030)、广西科技开发项目基金(1598008-15)、南宁市科技开发项目基金(20151268)

* E-mail: docsjh@ gxu.edu.cn

1 引 言

透明导电氧化物(TCO)薄膜材料已被广泛地应用于太阳电池、除霜玻璃、显示屏、微波器件等光电子器件^[1-5]。研制功能多样化、环境友好、成本低的 TCO 薄膜,对于半导体光电器件的发展具有重要意义。镓掺杂氧化锌(GZO)薄膜近些年引起了研究人员的广泛关注,原因在于它有望替代如今价格昂贵、资源紧缺、有毒且在氢等离子体环境下不稳定的铟掺杂氧化锡(ITO)薄膜^[6-8]。大量的研究表明:Ga—O 的键长与 Zn—O 的键长相近,因此适量的 Ga 掺杂引起的 ZnO 晶格的畸变不大^[6-7]; Ga³⁺ 替代 Zn²⁺ 能够在 ZnO 晶格中提供一个额外自由电子,从而使 GZO 薄膜能够获得良好的光电性能^[9]。

Ko 等^[10] 在 ZnO 中掺入原子数分数为 3% 的 Ga 制备了 GZO 薄膜,该薄膜的电阻率为 $4.3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$,可见光的平均透过率为 85%;Mahdhi 等^[11] 也制得了光电性能良好的 GZO 薄膜,其电阻率为 $8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$,透过率为 90%。虽然他们报道的 GZO 薄膜的电阻率及可见光透过率均可与 ITO 薄膜相比拟,但不同制备技术获得的 GZO 薄膜的性能相差很大,且 GZO 薄膜的稳定性不如 ITO 薄膜,因此有必要对 GZO 进行更深入的研究。GZO 薄膜有多种制备技术,这些技术一般可分为湿化学法和物理法^[12]。对于湿化学法而言,设备简单、成本低是其潜在的优势,但是该方法制备的 GZO 薄膜的质量远不如物理法。例如 Wang 等^[13] 采用溶胶-凝胶法制备的 GZO 薄膜虽然获得了高于 95% 的透过率,但其电阻率却高达 $1.12 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$;再如 Muchuweni 等^[14] 采用喷雾热解法获得的 GZO 薄膜的电阻率高达 $1.2 \Omega \cdot \text{cm}$ 。电阻率不理想是由结晶性不好造成的,这使得湿化学法制备的 GZO 薄膜难以应用于光电子设备。物理法能够较好地实现低电阻率、高质量 GZO 薄膜的制备。例如前面提到的 Ko 等^[10] 和 Mahdhi 等^[11] 采用磁控溅射法沉积的 GZO 薄膜具有结晶性好、透过率高、电阻率低等特点。脉冲激光沉积(PLD)法属于物理法的一种,能够方便地沉积高质量的薄膜,薄膜的电阻率可低至 $4.65 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ^[9]。PLD 技术的优点在于薄膜的生长温度低、沉积速率快、黏附性好,可以进行多组分薄膜材料的沉积,且薄膜的组分与靶材接近^[6,15-16]。

采用 PLD 技术生长 GZO 薄膜的工艺参数——Ga 掺杂浓度、衬底温度、脉冲激光能量及频率和气

氛压强等,对薄膜的性能具有显著影响,但是目前的研究大多侧重于 Ga 掺杂浓度、衬底温度、激光频率等参数。例如,Shinde 等^[17]、Kim 等^[18] 及 Shewale 等^[9] 分别证明了 Ga 掺杂浓度、衬底温度、激光脉冲频率对 GZO 薄膜结构及光电性能有重要影响。然而,目前还鲜有人研究氧气分压对 GZO 薄膜性能的影响。脉冲激光轰击并烧蚀靶材时,产生的多种高能粒子沉积到衬底上形成薄膜,虽然薄膜的成分与靶材相近,但是不同粒子的输运及扩散速率不一样,容易形成锌间隙、氧空位等缺陷,从而影响薄膜的光电性能,因此有必要研究氧气分压对 GZO 薄膜性能的影响。

本文采用 PLD 法在玻璃基底上沉积 GZO 薄膜。在不同的氧气分压下生长 GZO 薄膜,采用 X 射线衍射仪、原子力显微镜、紫外可见分光光度仪和霍尔测试系统研究氧气分压对薄膜微观结构、电学性能和光学性能的影响。

2 实 验

本实验采用 PLD 技术在普通玻璃基片上沉积 GZO 薄膜,所用的脉冲激光光源由 KFr 准分子激光器(激光波长 $\lambda = 248 \text{ nm}$,脉冲激光的持续时间 $\tau = 10 \text{ ns}$) 提供。在薄膜沉积前,依次采用去离子水、丙酮、无水乙醇对玻璃基片超声清洗 5 min,以获得表面干净的衬底。将干净的玻璃基片及 GZO 靶材(ZnO 的质量分数为 98%,Ga₂O₃ 的质量分数为 2%)平行安装到沉积室,并将靶材与基片的距离调为 55 mm。将衬底加热至 400 °C,沉积室的背景真空度抽到 $5.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 后,按实验所需的氧气分压通入氧气(氧气的纯度为 99.99%)。打开激光器,设置激光的能量为 160 mJ/pulse,频率为 5 Hz,将激光聚焦后轰击靶材。靶材表面往往会残留污染物,因此在生长薄膜前需用挡板遮挡基片,激光烧蚀靶材 5 min 后清除靶材表面的污染物,然后打开挡板进行薄膜沉积,薄膜沉积时间为 1 h。为了研究氧气分压对 GZO 薄膜结构及光电性能的影响,氧气分压分别设置为 0(即不通入氧气),0.5,1.0,5.0 Pa。

用 Rigaku D/MAX-RB 型 X 射线衍射仪(XRD)观察 GZO 薄膜的晶体结构;用 Agilent 5500 型原子力显微镜(AFM)表征薄膜的表面形貌;用 Sentech 850 DUV 型光谱偏振仪测量薄膜的厚度;用 PerkinElmer Lambda 950 型紫外可见分光光度计(UV)测量薄膜的光学透过率;用 Ecopia HMS-3000 型霍尔测试系统在室温下测试薄膜的电学

性能。

3 结果与分析

3.1 薄膜结构分析

图 1 是不同氧气分压下 GZO 薄膜的 XRD 图谱,可以看到,所有样品的图谱由一个强度大的(002)衍射峰和强度微弱的(100)、(004)衍射峰组成,说明 GZO 薄膜为六方纤锌矿结构,并沿(002)晶面择优生长,即沿 c 轴择优生长^[13,19-20]。在 XRD 图谱中没有发现 Ga_2O_3 等相的杂质峰,说明 Ga^{3+} 在 ZnO 晶格中与 Zn^{2+} 形成了替位离子,或者进入 ZnO 晶格的间隙位置,或者存在于晶界的非晶区域^[13]。(002)衍射峰的强度远大于其他衍射峰,说明 PLD 法制备的薄膜的结晶取向性和结晶质量都很好^[9]。随着氧气分压增大,(002)衍射峰的强度先增大后减小,当氧气分压为 0.5 Pa 时衍射强度最大,即在此氧气分压下可获得最佳的结晶质量,说明通入合适的氧气可以有效改善 GZO 薄膜的组织结构。不通入氧气时,薄膜在真空中生长,导致薄膜中产生大量的氧空位,使薄膜晶核的形成与长大困难,因而薄膜的质量差。此外,由表 1 可知:氧气分压为 0 Pa 时,GZO 薄膜的厚度最小,这可能是由于发生了粒子的反溅射,导致结晶性能不高;当氧气分压为 0.5 Pa 时,薄膜中的氧空位减少,有利于薄膜晶体的长大,改善薄膜的结晶性能;进一步增大氧气分压后,氧分子或原子会与脉冲激光烧蚀靶材产生的高能粒子碰撞,使 Zn^{2+} 、 O^{2-} 等离子沉积到衬底或已形成的薄膜表面,离子的扩散能力减小,不利于

GZO 晶粒的生长,因而继续增加氧气分压时薄膜的结晶质量反而变差。

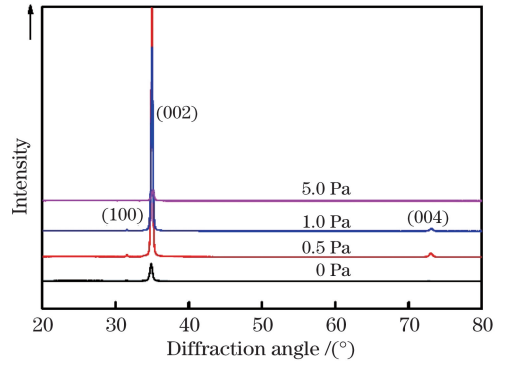


图 1 不同氧气分压下沉积的 GZO 薄膜的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of GZO films deposited at different oxygen pressures

表 1 记录了 GZO 薄膜的(002)衍射峰的位置 2θ 及半峰全宽($\omega_{1/2}$)、晶格常数和平均晶粒尺寸,所有 GZO 薄膜的(002)衍射峰均位于在 $34.87^\circ \sim 35.04^\circ$ 之间,比标准 ZnO ($2\theta = 34.422^\circ$) 的峰位更大^[9]。这是由 Ga^{3+} 在 ZnO 晶格替代 Zn^{2+} 造成的,因为 Ga 的原子半径比 Zn 的原子半径小,引起了晶格畸变,使晶格常数比标准 ZnO(0.5207 nm)的晶格常数小,从而使得衍射峰位置向大角度方向移动^[9,17]。 $\omega_{1/2}$ 在 $0.25^\circ \sim 0.386^\circ$ 之间变化, $\omega_{1/2}$ 越小表明结晶取向越好。薄膜的晶粒尺寸可以用谢乐公式^[18-19]计算得到。薄膜的平均晶粒尺寸随着氧气分压的增大而先增大后减小,当氧气分压为 0.5 Pa 时,晶粒的最大尺寸为 33.80 nm,结晶质量最好。这与上述讨论的(002)衍射峰强度时的结论一致。

表 1 不同氧气分压下 GZO 薄膜的微观特性参数

Table 1 Microstructure parameters of GZO films under different oxygen pressures

Oxygen pressures /Pa	Thickness /nm	$2\theta /(^{\circ})$	$\omega_{1/2} /(^{\circ})$	Lattice constant / (10^{-10} m)	Crystal size /nm	RMS /nm
0	139	34.87	0.386	5.1416	20.84	1.4
0.5	243	34.95	0.238	5.1302	33.80	3.9
1.0	264	34.97	0.25	5.1274	32.18	3.5
5.0	294	35.04	0.366	5.1174	21.98	1.8

3.2 薄膜的表面形貌分析

图 2 所示为不同氧气分压下沉积的 GZO 薄膜 ($2 \mu m \times 2 \mu m$) 的 AFM 形貌图,可见:所有薄膜的表面均由均匀的晶粒组成,薄膜表面致密平整;不通入氧气时,GZO 薄膜的晶界不是很清晰;当氧气分压为 0.5 Pa 时,薄膜的晶界清晰,且晶粒明显比不通入氧气时大;随着氧气分压进一步增大,薄膜的晶粒有减小的趋势,晶界逐渐模糊。这种变化

与前面分析 XRD 衍射图谱时所得结论一致,即:不通入氧气时,GZO 薄膜产生的大量氧空位缺陷导致结晶性能不佳,薄膜的晶粒尺寸变小,晶界模糊不清;而当氧气分压过大时,氧气分子与烧蚀靶材产生的高能粒子碰撞,使高能粒子在衬底或已形成的薄膜上吸附困难,或降低了吸附粒子的迁移能力,因此氧气分压过大时反而会降低 GZO 薄膜的结晶质量,晶粒尺寸减小,表面不清晰。由

表 1 可知, GZO 薄膜的表面粗糙度均方根 (RMS) 为 1.4~3.9 nm, 薄膜的表面粗糙度小, 说明薄膜

表面光滑、均匀致密。粗糙度增大是晶粒变大造成的^[21-22]。

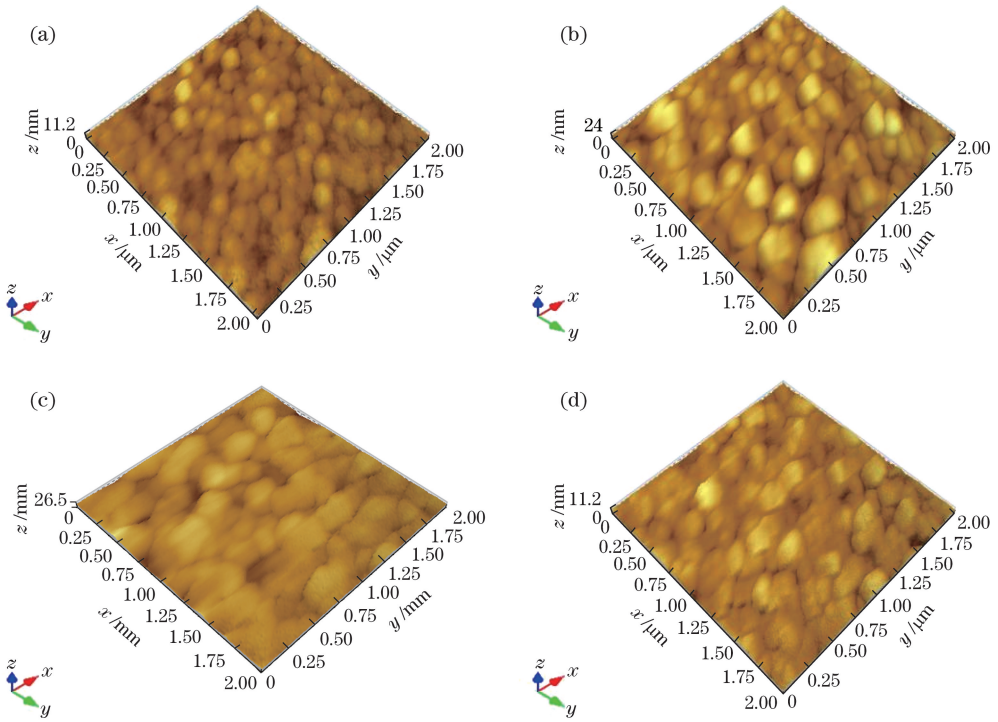


图 2 不同氧气分压下沉积的 GZO 薄膜的 AFM 形貌。(a) 0 Pa; (b) 0.5 Pa; (c) 1.0 Pa; (d) 5.0 Pa

Fig. 2 AFM images of GZO films deposited under different oxygen pressures.

(a) 0 Pa; (b) 0.5 Pa; (c) 1.0 Pa; (d) 5.0 Pa

3.3 薄膜的电学特性

由图 3 可知, 薄膜的载流子浓度较高, 在 $4.3 \times 10^{20} \sim 1.26 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 之间变化, 说明 Ga^{3+} 成功地与 Zn^{2+} 形成替位离子, 并在 ZnO 晶格中提供了额外的自由电子^[23]。载流子迁移率在 $4.55 \sim 16.78 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 之间变化, 随着氧气分压增大, 无论是霍尔迁移率还是载流子浓度, 都表现出与晶粒

尺寸一样的变化趋势, 即先增大后减小, 当氧气分压为 0.5 Pa 时, 薄膜获得了最大的载流子浓度和霍尔迁移率。这表明薄膜的霍尔迁移率与载流子浓度的增大有赖于结晶质量的改善, 因为结晶质量越高, 晶粒尺寸越大, 晶界越小, 载流子受到晶界的散射就越小, 有利于增大霍尔迁移率^[24]。而高的结晶质量又有利于减少结构缺陷, 从而减小缺陷对自由电子的

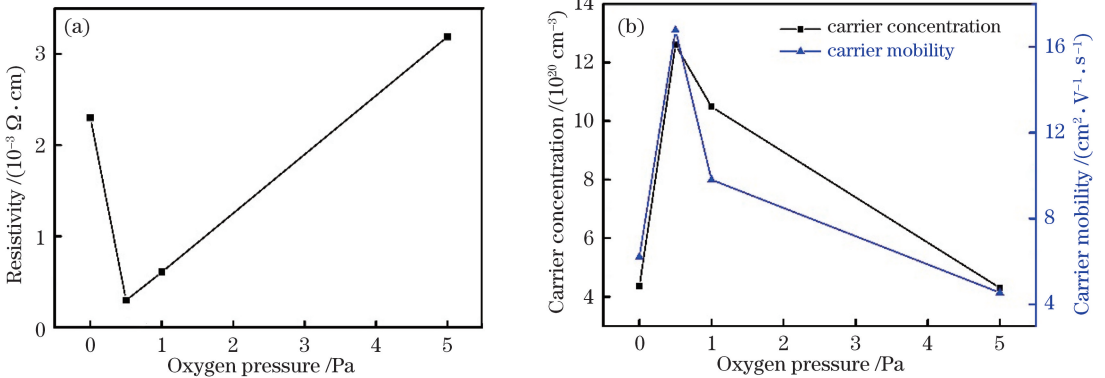


图 3 GZO 薄膜的电阻率、载流子浓度、霍尔迁移率随氧气分压的变化曲线。

(a) 电阻率随氧气分压的变化; (b) 载流子浓度和霍尔迁移率随氧气分压的变化

Fig. 3 Resistivity of GZO film, carrier density, and Hall mobility vary with oxygen pressure. (a) Resistivity varies with oxygen pressure; (b) carrier density and Hall mobility vary with oxygen pressure

束缚作用,增大载流子浓度。众所周知,透明导电氧化物的电阻率 ρ 与霍尔迁移率 μ 、载流子浓度 N 之间存在反比关系^[25]。即,要减小薄膜的电阻率,就要增大载流子的浓度与霍尔迁移率。当氧气分压为 0 Pa 时,由 XRD 分析可知,此时 GZO 薄膜的厚度较薄,结晶质量不好,因而电阻率较大;而在合适氧气分压下,薄膜的结晶质量变好,从而使得薄膜的电阻率减小。当氧气分压为 0.5 Pa 时,GZO 薄膜的结晶质量最佳,霍尔迁移率及载流子浓度最大,此时薄膜的电阻率最小,为 $2.95 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$,这比文献[10-11]报道的电阻率小。

3.4 薄膜的光学特性

不同氧气分压下生长的 GZO 薄膜的紫外-可见光谱(300~800 nm)如图 4 所示。从图 4 可以看到明显的具有深波谷和高波峰的干涉条纹^[9],这表明制备的薄膜表面光滑致密,成膜质量高。然而,不同的 GZO 薄膜对光的吸收存在差异。由表 1 可知,GZO 薄膜的厚度不一样,从而造成吸收光的差异。对 TCO 薄膜在可见光区域(380~800 nm)的平均透过率有较高的要求,一般要求在 80% 以上,以更有利于光电器件的应用。在 0,0.5,1.0,5.0 Pa 氧气分压下沉积的 GZO 薄膜的平均透过率(T_{avg})分别为 94.59%、91.97%、92.30%、93.26%,所得的平均透过率较高,光学性能良好,可应用于光电子器件的制备中^[26-27]。透过率图谱中在 360 nm 附近有陡峭的吸收边,这是由 ZnO 材料中电子在价带与导带之间的跃迁吸收产生的^[25]。

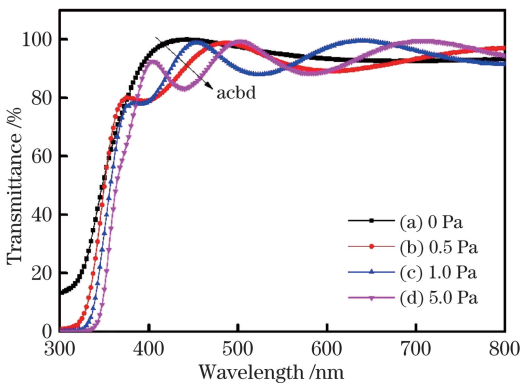


图 4 不同氧气分压下 GZO 薄膜的透过率曲线
Fig. 4 Optical transmittance of GZO thin films under different oxygen pressures

对于直接带隙半导体,其光学带隙(E_g)可以通过著名的 Tauc 法^[28-29]得到;以 $(ah\nu)^2$ 为纵坐标,以 $h\nu$ 为横坐标作图,外推直线部分与 $h\nu$ 轴相切的截距便是 E_g ,所得结果如图 5 所示。 a 、 h 和 ν 分别为

光吸收系数、普朗克常数和光子频率。随着氧气分压的增大,GZO 薄膜的 E_g 分别为 3.529, 3.576, 3.548, 3.492 eV,这与以往文献报道的结果相近^[9,30]。相比于标准的 ZnO 禁带宽度(3.3 eV),GZO 薄膜的禁带宽度更大,会出现蓝移现象,这是因为载流子浓度增大造成了禁带增宽效应,即 Burstein-Moss 效应^[30-31];随着载流子浓度增大,费米能级会向导带底移动,直至进入导带,从而需要更大能量的光子才能激发价电子跃迁到费米能级以上,使之成为自由载流子。

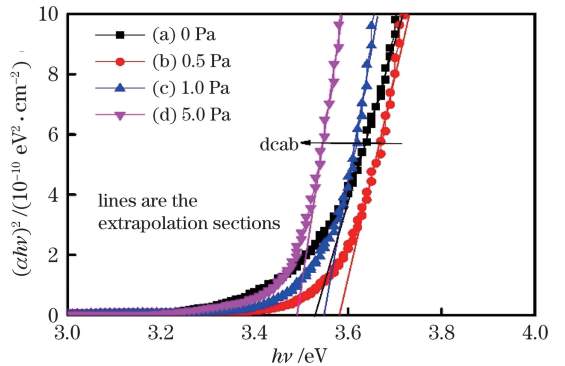


图 5 不同氧气分压下 GZO 薄膜的透过率曲线
Fig. 5 Optical band gaps of GZO thin films under different oxygen pressures

4 结 论

采用脉冲激光沉积技术在不同氧气分压下,在玻璃基片上制备了高质量的 GZO 薄膜,研究了氧气分压对 GZO 薄膜光电性能的影响。结果表明:所制备的 GZO 薄膜具有以(002)面高度择优生长的六方纤锌矿结构,薄膜表面光滑致密且均匀,薄膜的结晶性随氧气分压的增大先增加后减小,且在氧气分压为 0.5 Pa 时最佳;GZO 在可见光波段的平均透过率在 91.97% 以上,具有高透性,禁带宽度在 3.492~3.576 eV 之间变化;随着氧气分压的增大,薄膜的电阻率先减小后增大,表明适当的氧气分压对于制备高质量、低电阻率的 GZO 薄膜是必需的,在 0.5 Pa 时可获得最小的电阻率,为 $2.95 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。所沉积的高透过率、低电阻率 GZO 薄膜有望应用于各类光电子器件。

参 考 文 献

[1] Ungula J, Dejene B F, Swart H C. Band gap engineering, enhanced morphology and photoluminescence of un-doped, Ga and/or Al-doped ZnO nanoparticles by reflux precipitation method[J].

- Journal of Luminescence, 2018, 195: 54-60.
- [2] Shao J Z, Wang X, Hu H T, *et al.* Thermal effect simulation analysis on excimer laser annealing of zinc oxide thin films [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061401.
邵景珍, 王玺, 胡红涛, 等. 氧化锌薄膜的准分子激光退火热效应模拟分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061401.
- [3] Muchuweni E, Sathiaraj T S, Nyakoty H. Hydrothermal synthesis of ZnO nanowires on RF sputtered Ga and Al co-doped ZnO thin films for solar cell application [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 721: 45-54.
- [4] Yoshida Y, Tanaka S, Hiromitsu I, *et al.* Ga-doped ZnO film as a transparent electrode for phthalocyanine/perylene heterojunction solar cell[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(2): 867-871.
- [5] Su X Q, Wang L, Chen J B, *et al.* Properties of ZnO thin films with effect of substrate temperature by PLD[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 296-300.
苏雪琼, 王丽, 陈江博, 等. 不同衬底温度下 PLD 法制备的氧化锌薄膜的特性[J]. 光子学报, 2010, 39(2): 296-300.
- [6] Wang F H, Chen K N, Hsu C M, *et al.* Investigation of the structural, electrical, and optical properties of the nano-scale GZO thin films on glass and flexible polyimide substrates[J]. Nanomaterials, 2016, 6(5): 88.
- [7] Chen Y Y, Juang J Y. Enhancement of Ga-doped zinc oxide film properties and deposition rate by multiple deposition using atmosphere pressure plasma jet[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 694: 452-458.
- [8] Liao L C K, Huang J S. Effect of indium- and gallium-doped ZnO fabricated through sol-gel processing on energy level variations[J]. Materials Research Bulletin, 2018, 97: 6-12.
- [9] Shewale P S, Lee S H, Yu Y S. Pulse repetition rate dependent structural, surface morphological and optoelectronic properties of Ga-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 725: 1106-1114.
- [10] Ko Y D, Kim K C, Kim Y S. Effects of substrate temperature on the Ga-doped ZnO films as an anode material of organic light emitting diodes [J]. Superlattices and Microstructures, 2012, 51(6): 933-941.
- [11] Mahdhi H, Alaya S, Gauffier J L, *et al.* Influence of thickness on the structural, optical and electrical properties of Ga-doped ZnO thin films deposited by sputtering magnetron [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 697-703.
- [12] Ebrahimifard R, Golobostanfard M R, Abdizadeh H. Sol-gel derived Al and Ga co-doped ZnO thin films: an optoelectronic study[J]. Applied Surface Science, 2014, 290: 252-259.
- [13] Wang H L, Sun Y H, Fang L, *et al.* Growth and characterization of high transmittance GZO films prepared by sol-gel method [J]. Thin Solid Films, 2016, 615: 19-24.
- [14] Muchuweni E, Sathiaraj T S, Nyakoty H. Effect of gallium doping on the structural, optical and electrical properties of zinc oxide thin films prepared by spray pyrolysis[J]. Ceramics International, 2016, 42(8): 10066-10070.
- [15] El-Desoky M M, Ali M A, Afifi G, *et al.* Annealing effects on the structural and optical properties of growth ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition (PLD) [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2014, 25(11): 5071-5077.
- [16] Han S, Shao Y K, Lu Y M, *et al.* Effect of different migration energy for reaction atoms on growth orientation and optical absorption characteristics of cubic MgZnO thin films under different pressure by PLD method[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 408: 125-128.
- [17] Shinde S D, Deshmukh A V, Date S K, *et al.* Effect of Ga doping on micro/structural, electrical and optical properties of pulsed laser deposited ZnO thin films[J]. Thin Solid Films, 2011, 520(4): 1212-1217.
- [18] Kim J H, Koo S M. Effect of epitaxial growth on electrical properties of Ga-doped ZnO thin films[J]. Ceramics International, 2015, 41(1): 37-42.
- [19] Jen S U, Sun H, Chiang H P, *et al.* Optoelectronic properties and the electrical stability of Ga-doped ZnO thin films prepared via radio frequency sputtering[J]. Materials, 2016, 9(12): E987.
- [20] Shewale P S, Lee S H, Yu Y S. UV sensitive pulsed laser deposited ZnO thin films: influence of growth temperature[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 744: 849-858.
- [21] Zou Y S, Wang S L, Yang H, *et al.* Effect of substrate temperature on microstructure and optical properties of Ga doped ZnO films deposited by pulsed laser deposition [J]. Surface Engineering, 2015, 31(4): 302-307.
- [22] Akin N, Kinaci B, Ozen Y, *et al.* Influence of RF power on the opto-electrical and structural properties of gallium-doped zinc oxide thin films[J]. Journal of

- Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28 (10): 7376-7384.
- [23] Garg V, Sengar B S, Awasthi V, *et al.* Investigation of dual-ion beam sputter-instigated plasmon generation in TCOs: a case study of GZO[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(6): 5464-5474.
- [24] Hsu F H, Wang N F, Tsai Y Z, *et al.* A novel Al and Y codoped ZnO/n-Si heterojunction solar cells fabricated by pulsed laser deposition [J]. Solar Energy, 2012, 86(11): 3146-3152.
- [25] Peng S, Yao T T, Yang Y, *et al.* Influences of the RF power ratio on the optical and electrical properties of GZO thin films by DC coupled RF magnetron sputtering at room temperature [J]. Physica B: Condensed Matter, 2016, 503: 111-116.
- [26] Yan X, Li W M, Aberle A G, *et al.* Investigation of the thickness effect on material and surface texturing properties of sputtered ZnO:Al films for thin-film Si solar cell applications[J]. Vacuum, 2015, 123: 151-159.
- [27] Ajimsha R S, Das A K, Misra P, *et al.* Observation of low resistivity and high mobility in Ga doped ZnO thin films grown by buffer assisted pulsed laser deposition [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 638: 55-58.
- [28] Shin H H, Joung Y H, Kang S J. Influence of the substrate temperature on the optical and electrical properties of Ga-doped ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2009, 20(8): 704-708.
- [29] Tsay C Y, Hsu W T. Comparative studies on ultraviolet-light-derived photoresponse properties of ZnO, AZO, and GZO transparent semiconductor thin films[J]. Materials, 2017, 10(12): 1379.
- [30] Mahdhi H, Ben Ayadi Z, Hadded N, *et al.* Study of gallium doping and substrate temperature effects on structural, electrical and optical properties of ZnO semiconductor layers [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26 (12): 9873-9881.
- [31] Guo D S, Chen Z N, Wang D K, *et al.* Effects of annealing temperature on crystal quality and photoelectric properties of Al-doped ZnO thin film [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (4): 0403002.
- 郭德双, 陈子男, 王登魁, 等. 退火温度对铝掺杂氧化锌薄膜晶体质量及光电性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0403002.