doi：10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023481

Ag 掺杂 In_2O_3 薄膜的制备及其光电性能

韩梦瑶，孙 辉，周鸥翔，齐东丽，李同辉，沈龙海
（沈阳理工大学 理学院，沈阳 110159）

摘要： 为研究 Ag 的掺杂浓度对氧化铟薄膜禁带宽度、光开关比及光探测率等光电性能的影响，采用磁控溅射方法在石英(SiO_2)衬底上制备不同浓度的 Ag 掺杂氧化铟(In_2O_3：Ag)薄膜，并利用 X 射线衍射、X 射线光电子能谱、扫描电子显微镜、紫外-可见分光光度计分析 In_2O_3：Ag 薄膜的晶体结构、元素含量和价态、表面形貌、禁带宽度及光电性能. 结果表明：随着 Ag 掺杂浓度的增加，In_2O_3：Ag 薄膜的透过率逐渐降低，禁带宽度由 2.47 eV 减小至 2.08 eV，光探测率和光开关比增大；随着掺杂浓度的增加，光谱响应范围增加.

关键词： 氧化铟；Ag 掺杂；磁控溅射；禁带宽度；光电性能
中图分类号： O484.4 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671-5489(2024)04-0985-07

Preparation and Photoelectric Performance of Ag Doped In_2O_3 Thin Films

HAN Mengyao, SUN Hui, ZHOU Ouxiang, QI Dongli, LI Tonghui, SHEN Longhai
(*School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang* 110159, *China*)

Abstract: In order to investigate the effects of Ag doping concentration on the photoelectric performance of In_2O_3 thin films, such as bandgap width, optical switching ratio and optical detectivity, Ag doped In_2O_3 (In_2O_3 : Ag) thin films with different concentrations were prepared by magnetron sputtering method on quartz (SiO_2) substrate. The crystal structure, elemental content and valence state, surface morphology, bandgap width and photoelectric performance of In_2O_3 : Ag thin films were analyzed by using X-ray diffraction, X-ray photoelectron spectroscopy, scanning electron microscopy and ultraviolet-visible spectrophotometer. The results show that with the increase of Ag doping concentration, the transmittance of In_2O_3 : Ag thin films gradually decreases, the bandgap width decreases from 2.47 eV to 2.08 eV, and the optical detectivity and optical switching ratio increase. The spectral response range increases with the increase of doping concentration.

Keywords: indium oxide; Ag doping; magnetron sputtering; bandgap width; photoelectric performance

氧化铟(In_2O_3)是一种宽带隙(3.6 eV)金属氧化物半导体[1-2]，具有较高的电子迁移率[3]、优异的气体灵敏性[4]、良好的催化性以及较高的可见光透明度[5]，在平板显示器、传感器[6-7]、光催化[8]、有机发光二极管(OLEDs)[9]、太阳能电池[10]、数据存储以及光电探测[11]等领域应用广泛.

掺杂可改变 In_2O_3 薄膜的缺陷类型[12]，调节禁带宽度[13]和电导率[14]. 使用射频磁控溅射方法，

收稿日期： 2023-11-09.

第一作者简介： 韩梦瑶(2000—)，女，汉族，硕士研究生，从事光电材料和器件的研究，E-mail：1663989810@qq.com. **通信作者简介：** 沈龙海(1977—)，男，朝鲜族，博士，教授，从事光电材料和器件的研究，E-mail：shenlonghai@163.com.

基金项目： 国家自然科学基金(批准号：12274304).

Tchenka 等[15]制备了低电阻率的锡(Sn)掺杂 In_2O_3 薄膜；Krishnan 等[16]在室温下制备了高结晶度的钨(W)掺杂 In_2O_3 薄膜；Krishnan 等[17]制备了高透过率的铌(Nb)掺杂 In_2O_3 薄膜. 使用电子束蒸发方法，Islam 等[2]制备了具有较高近红外透射率的钒(V)掺杂 In_2O_3 薄膜；Jiang 等[18]研究表明，Fe 掺杂 In_2O_3 纳米点阵列的铁磁性和能带隙显著增强；Zhang 等[19]采用复合软模板法制备了 In_2O_3 空心球，并通过浸渍和退火的方法在复合材料中掺入 Ag 以提高其气敏和传感性能；Nath 等[20]用掠射角沉积技术制备了 Ag 修饰 In_2O_3 纳米线，其光导增强、光敏性能提高；Ding 等[21]用溶剂热路线与后续热处理相结合研制了一种 Ag 掺杂海胆空心球 In_2O_3 层状纳米结构，提高了气敏性能；Nath 等[22]用电子束蒸发法制备了 Ag 纳米粒子遮蔽 In_2O_3 纳米线，在紫外区和可见光区光吸收增强. 由于 In_2O_3 ∶ Ag 纳米粉体材料具有优异的光导、气敏和光敏性能，因此其相应的薄膜结构更有利于与功能器件集成. 磁控溅射方法具有操作简便、低成本、低温沉积、良好的膜黏附性、良好的均匀性等优点，有利于大规模生产，广泛应用于薄膜制备. Subrahmanyam 等[23]用磁控溅射方法，在氩气和氧气氛围下对 Ag 和 In 合金靶材溅射制备了 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜；Cho 等[24]采用双靶共溅射方法对 Ag 靶材和 In_2O_3 靶材进行溅射，制备了 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜.

本文利用磁控溅射方法，对 In_2O_3 靶材和放置于靶材上不同质量金属 Ag 颗粒进行溅射，在石英衬底上制备不同 Ag 掺杂浓度的 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜，并分析银掺杂浓度对 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜的禁带宽度、光开关比以及光探测率等光电性能的影响.

1 实 验

1.1 制备方法

利用磁控溅射仪器在石英衬底上制备 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜. 实验材料是质量分数为 99.999%、直径和厚度分别为 50.8 mm 和 3 mm 的圆形 In_2O_3 靶及质量分数为 99.999%的 Ag 颗粒. 工作气体是体积分数为 99.999% 的氧气和氩气. 石英基片在超声清洗去污后置于反应腔体内，抽真空至 5.0×10^{-4} Pa，通入氩气辉光清洗石英基片，通入氧气和氩气的混合气体对 In_2O_3 靶材预溅射 10 min 后正式溅射. 改变放置 Ag 的质量制备出不同掺杂浓度的 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜，In_2O_3 ∶ Ag 薄膜的生长参数列于表 1.

表 1 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜生长参数

Table 1 Growth parameters of In_2O_3 ∶ Ag thin films

样品	靶机距/cm	射频功率/W	气压/Pa	$V(O_2)$ ∶ $V(Ar)$	沉积时间/h	Ag 质量/g
Ag1	7	100	5×10^{-4}	1 ∶ 11	1	0.1
Ag3	7	100	5×10^{-4}	1 ∶ 11	1	0.2
Ag5	7	100	5×10^{-4}	1 ∶ 11	1	0.3

1.2 样品表征

采用 Cu Kα 辐射、波长为 0.154 1 nm Hitachi D/max 2500PC 型 X 射线衍射(XRD)仪表征晶体结构. 采用 Thermo Scientific ESCALAB250 Xi 型 X 射线光电子能谱(XPS)分析薄膜元素成分. 采用 Zeiss Sigma 300 型扫描电子显微镜(SEM)表征薄膜形貌. 采用 PerkinElmer LAMBDA 950 型紫外-可见分光光度计分析薄膜的光学透过率和禁带宽度. 采用 Keithley4200-SCS 型半导体分析仪(光源为 365 nm 和 532 nm 的 LED)分析样品的光电性能.

2 结果和讨论

2.1 薄膜的 XRD 分析

图 1 为不同 Ag 掺杂浓度的 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜样品的 XRD 谱. 所有样品 XRD 谱可指标化为立方晶系的 In_2O_3 晶体(JCPDS 06-0416)，XRD 谱中未出现其他衍射峰，表明实验过程中未生成其他杂质相. In_2O_3 ∶ Ag 薄膜的衍射峰向小角度偏移，一方面是因为 Ag^+ 替换 In^{3+} 掺入 In_2O_3 晶格内(Ag^+ 的半径

为 126 nm，In^{3+} 的半径为 80 nm)，另一方面是因为 Ag 掺入 In_2O_3 晶格间隙使晶格的间距增大，晶格常数变大，导致衍射峰向小角度偏移. 衍射峰偏移说明 Ag 已成功掺入 In_2O_3 晶体中. (440)衍射峰强度明显增强，说明 Ag 掺入加快了晶粒沿(440)方向的生长速度. In_2O_3 ∶ Ag 薄膜的半峰宽和晶粒尺寸列于表 2. 由表 2 可见：随着 Ag 质量的增加，Ag 弥补了更多 In_2O_3 晶格中存在的缺陷[25]，导致 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜的半峰宽逐渐减小；Ag 掺入使 In_2O_3 更易聚集形成晶粒，导致 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜晶粒尺寸增大，结晶质量提高[26-27].

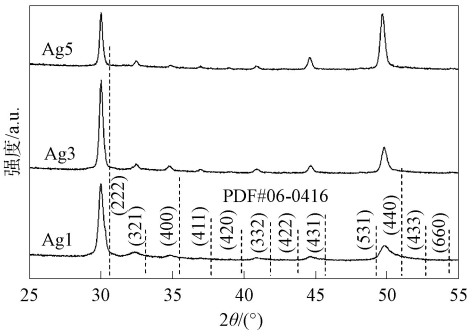


图 1　不同 Ag 掺杂浓度的 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜的 XRD 谱

Fig. 1　XRD patterns of In_2O_3 ∶ Ag thin films with different Ag doping concentrations

表 2　In_2O_3 ∶ Ag 薄膜的半峰宽和晶粒尺寸

Table 2　Half-peak width and grain size of In_2O_3 ∶ Ag thin films

样品	衍射峰	衍射角/(°)	半峰宽/(°)	平均晶粒尺寸/nm
Ag1	(222)	29.97	0.38	22.49
	(440)	49.82	0.80	
Ag3	(222)	29.97	0.29	29.51
	(440)	49.80	0.43	
Ag5	(222)	20.97	0.23	36.54
	(440)	49.69	0.37	

2.2　薄膜的 XPS 分析

为进一步证实 Ag 掺入 In_2O_3 中，对 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜进行元素含量及价态分析. 图 2 为 In_2O_3 ∶ Ag薄膜的 XPS(以 284.8 eV 的 C 1*s* 峰校正). 由图 2(A)可见，In_2O_3 ∶ Ag 薄膜含有 C，Ag，In，O 元素，其中 Ag1，Ag3，Ag5 样品的 Ag 掺杂浓度(原子比)分别为 0.55%，1.03%和 1.96%. 由图 2(B)～(D)可见，Ag 3*d* 光谱可拟合为 4 个特征峰，Ag^0 $3d_{3/2}$和 Ag^0 $3d_{5/2}$的结合能与单质 Ag 一致，由单质 Ag 进入 In_2O_3 晶格间隙所致[28]，Ag^+ $3d_{3/2}$和 Ag^+ $3d_{5/2}$与 Ag 离子有关，由 Ag 离子取代 In_2O_3 晶格中的 In 离子所致[21,29]，说明 In_2O_3 ∶ Ag 中 Ag 以单质和离子两种形式存在. In_2O_3 ∶ Ag 薄膜 Ag 3*d* 的 XPS 拟合结果列于表 3. 由表 3 可见，随着掺杂浓度的增加，In_2O_3 ∶ Ag 薄膜中银离子(Ag^+)和银单质(Ag^0)含量均增加，In_2O_3 ∶ Ag 薄膜中 Ag 主要以单质的形式存在，以离子的形式存在较少，说明 Ag 以间隙式掺杂比例多、替位式掺杂比例少.

表 3　In_2O_3 ∶ Ag 薄膜 Ag 3*d* 的 XPS 拟合结果

Table 3　XPS fitting results of In_2O_3 ∶ Ag thin film Ag 3*d*

样品	Ag 的价态	$3d_{5/2}$和 $3d_{3/2}$的结合能/eV	薄膜中百分数/%
Ag1	Ag^+	366.8，372.8	0.04
	Ag^0	368.4，374.5	0.51
Ag3	Ag^+	367.3，373.4	0.12
	Ag^0	368.7，374.7	0.91
Ag5	Ag^+	367.1，372.9	0.14
	Ag^0	368.7，374.6	1.82

2.3　薄膜的形貌分析

图 3 为不同 Ag 掺杂浓度的 In_2O_3 ∶ Ag 薄膜表面形貌 SEM 照片. 由图 3 可见，In_2O_3 ∶ Ag 薄膜表面颗粒分布均匀、连接紧密. 随着 Ag 掺杂浓度的增加，晶粒尺寸更均匀，颗粒更紧凑，形态更清晰. 由图 3(A)可见，当掺杂浓度为 0.55%时，样品呈球状颗粒. 由图 3(B)可见，当掺杂浓度为 1.03%时，样品表面形貌呈长条状颗粒较多，颗粒的平均尺寸为 46 nm. 由图 3(C)可见，当掺杂浓度

为1.96%时，样品表面形貌呈球状颗粒较多，颗粒的平均尺寸约为40 nm.

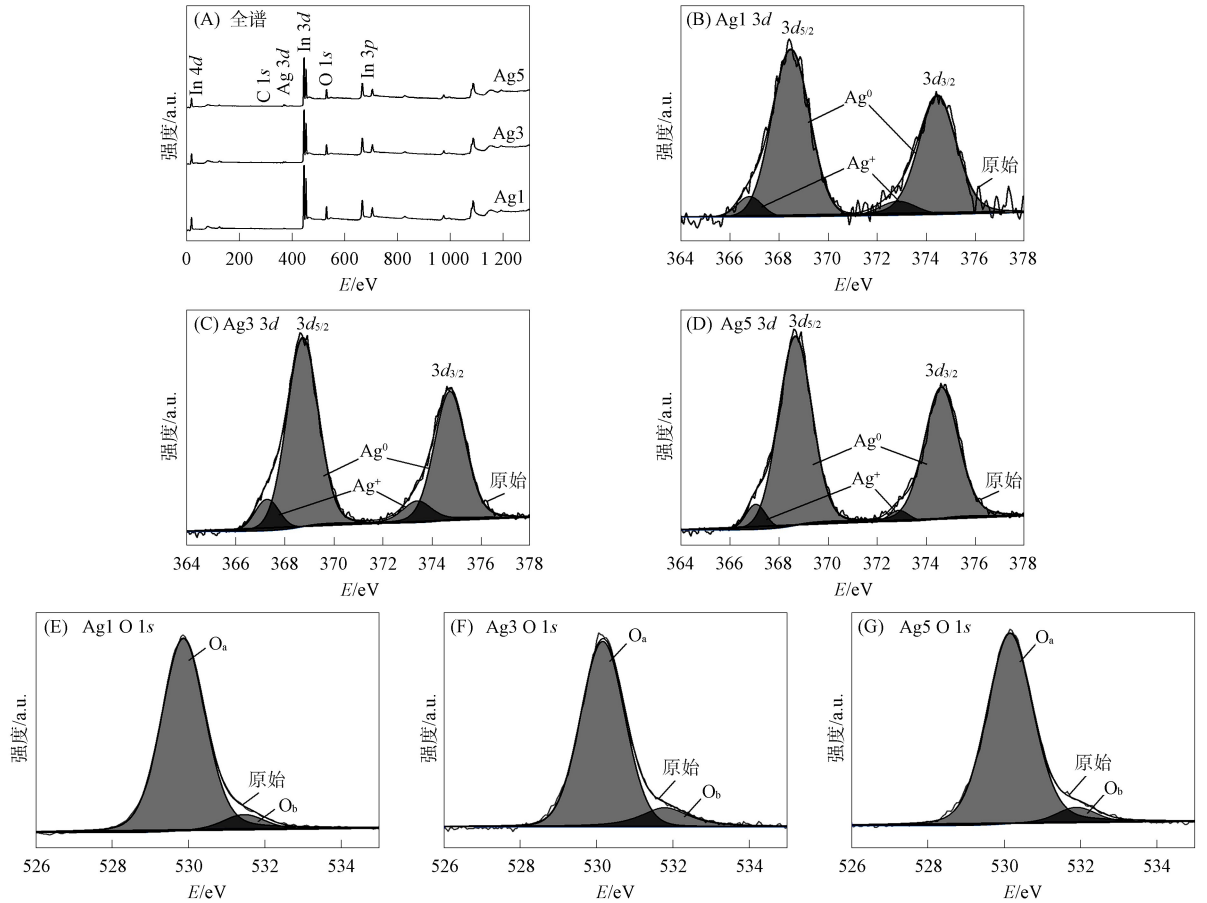


图2 In_2O_3：Ag薄膜的XPS

Fig. 2 XPS of In_2O_3 : Ag thin films

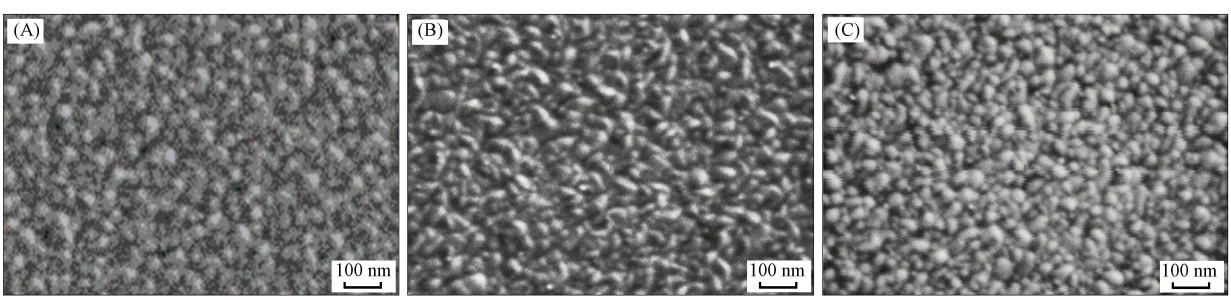


图3 不同Ag掺杂浓度的In_2O_3：Ag薄膜表面形貌SEM照片

Fig. 3 SEM images of surface morphology of In_2O_3 : Ag thin films with different Ag doping concentrations

2.4 薄膜的光电性能分析

图4为In_2O_3：Ag薄膜的紫外-可见光透射光谱. 由图4可见，Ag1，Ag3，Ag5在450～800 nm内的平均透过率分别为60.19%，44.57%，36.07%，In_2O_3：Ag薄膜在可见光范围明显高于紫外光范围的平均透过率. 图5为In_2O_3：Ag薄膜的$(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$曲线，其切线在横轴截距为薄膜的禁带宽度值[30]. 由图5可见，In_2O_3：Ag薄膜的禁带宽度分别为2.47，2.21，2.08 eV. 由于Ag_2O的禁带宽度(1.2 eV)比In_2O_3的禁带宽度(3.6 eV)小，随着Ag掺杂浓度的增加，Ag替代In比例增高，因此In_2O_3：Ag薄膜的禁带宽度减小[25,31].

图6为光电探测器的示意图. 利用光电探测器对低掺杂浓度(Ag1)和高掺杂浓度(Ag5)的In_2O_3：Ag薄膜进行光电性能测试. Ag1在365 nm光照、Ag5在365 nm光照和Ag5在532 nm光照

下的光响应曲线如图 7 所示.

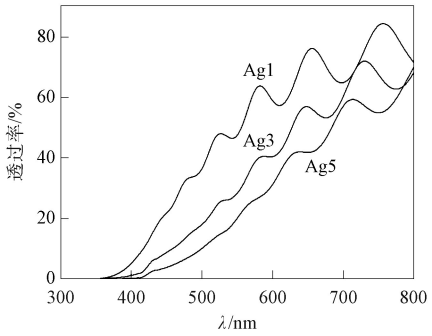


图 4　In_2O_3 ：Ag 薄膜的紫外-可见光透射光谱

Fig. 4　UV-Vis light transmission spectra of In_2O_3 ：Ag thin films

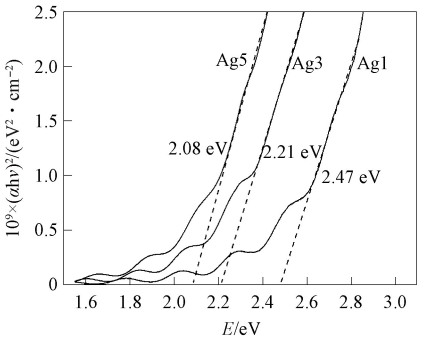


图 5　In_2O_3 ：Ag 薄膜的 $(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$ 曲线

Fig. 5　$(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$ curves of In_2O_3 ：Ag thin films

由图 7 可见：Ag1 样品仅对 365 nm 的紫外光有光响应；由于 Ag5 样品的禁带宽度减小，使得在更低能量 532 nm 光照下使电子从价带跃迁至导带，因此对 365 nm 的紫外光和 532 nm 的绿色可见光均有光响应，说明掺杂浓度高的 In_2O_3 ：Ag 薄膜具有多波长光响应特性. Ag1 在 365 nm 光照下的光响应上升和下降时间分别为 1.91 s 和 4.20 s，Ag5 在 365 nm 和 532 nm 光照下的光响应上升时间分别为 3.59 s 和 5.34 s，下降时间分别为 4.52 s 和 6.70 s. 与非金属元素氮掺杂 In_2O_3 薄膜[27]相比，In_2O_3 ：Ag 薄膜的暗电流更小，可达到 1 pA，探测时会产生更少的噪声干扰，从而提高信噪比和灵敏度. Ag1 在 365 nm 光照下的光探测率为 8.24×10^9(cm·$Hz^{1/2}$)/W，Ag5 在 365，532 nm 光照下的光探测率分别为 1.07×10^{10}(cm·$Hz^{1/2}$)/W 和 2.55×10^{10}(cm·$Hz^{1/2}$)/W，由 Ag 掺杂浓度高的 In_2O_3 ：Ag 薄膜所制备的光电探测器在探测微弱光信号方面具有优越的性能提升. Ag1 和 Ag5 在 365 nm 光照与黑暗状态下的 *I-V* 曲线如图 8 所示. 由图 8 可见，在 2.5 V 电压下，Ag1 和 Ag5 样品的光开关比(I_{light}/I_{dark})分别为 1.24 和 1.42，Ag 掺杂浓度高的 In_2O_3 ：Ag 薄膜具有更大的光开关比，光电探测能力更强[31-32].



图 6　光电探测器的示意图

Fig. 6　Schematic diagram of photodetector

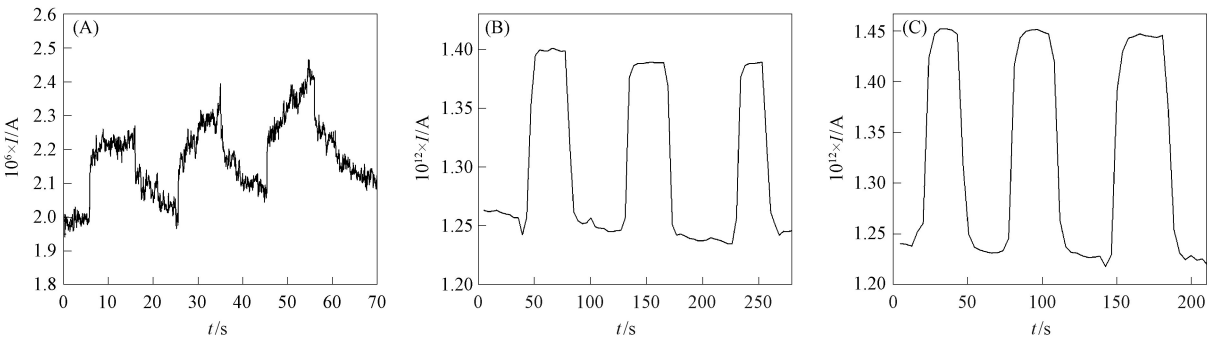


图 7　Ag1 在 365 nm 光照(A)、Ag5 在 365 nm 光照(B)和 Ag5 在 532 nm 光照(C)下的光响应曲线

Fig. 7　Optical response curves of Ag1 under 365 nm illumination (A), Ag5 under 365 nm illumination (B) and Ag5 under 532 nm illumination (C)

综上，本文采用磁控溅射法制备了不同掺杂浓度的 In_2O_3 ：Ag 薄膜. 实验结果表明，随着 Ag 掺杂浓度(原子比)由 0.55%增大到 1.96%，In_2O_3 ：Ag 薄膜的晶粒尺寸变大，结晶质量变好，In_2O_3 ：Ag 薄膜的禁带宽度由 2.47 eV 减小至 2.08 eV，光探测率和光开光比均得到提升. 掺杂浓度为 1.96%的

In_2O_3∶Ag 薄膜对 365 nm(紫外光)与 532 nm(绿光)光源均有响应，可用于制作多波长探测器.

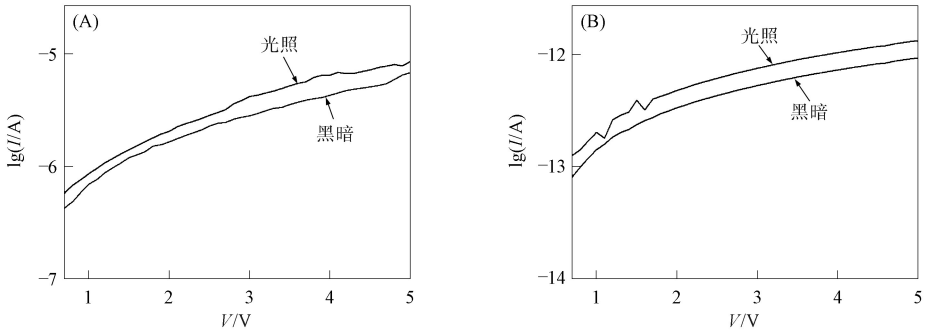


图 8 Ag1(A)和 Ag5(B)在 365 nm 光照与黑暗状态下的 *I-V* 曲线

Fig. 8 *I-V* curves of Ag1 (A) and Ag5 (B) under 365 nm illumination and dark conditions

参 考 文 献

[1] SARIKET D, SHYAMAL S, HAJRA P, et al. Temperature Controlled Fabrication of Chemically Synthesized Cubic In_2O_3 Crystallites for Improved Photoelectrochemical Water Oxidation [J]. Materials Chemistry and Physics, 2017, 201: 7-17.

[2] ISLAM A, MOU R, ROY R, et al. High Near-Infrared Transmittance, High Intense Orange Luminescence in Vanadium Doped Indium Oxide (V∶In_2O_3) Thin Films Deposited by Electron Beam Evaporation [J]. Optik, 2018, 157: 208-216.

[3] JOTHIBAS M, MANOHARAN C, JEYAKUMAR J, et al. Study on Structural and Optical Behaviors of In_2O_3 Nanocrystals as Potential Candidate for Optoelectronic Devices [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26: 9600-9606.

[4] LIU N, LI Y, LI Y N, et al. Tunable NH_4F-Assisted Synthesis of 3D Porous In_2O_3 Microcubes for Outstanding NO_2 Gas-Sensing Performance: Fast Equilibrium at High Temperature and Resistant to Humidity at Room Temperature [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(12): 14355-14364.

[5] HAN D, ZHAI L, GU F, et al. Highly Sensitive NO_2 Gas Sensor of ppb-Level Detection Based on In_2O_3 Nanobricks at Low Temperature [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 262: 655-663.

[6] KOROTCENKOV G, BRINZARI V, CHO B K. In_2O_3-and SnO_2-Based Ozone Sensors: Design and Characterization [J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2018, 43(2): 83-132.

[7] NGUYEN N, CHOI N, AHEMAD J, et al. Hydrothermal Synthesis of In_2O_3 Nanocubes for Highly Responsive and Selective Ethanol Gas Sensing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 820: 153133-1-153133-7.

[8] WANG Q, CHEN Y J, LIU X, et al. Sulfur Doped In_2O_3-CeO_2 Hollow Hexagonal Prisms with Carbon Coating for Efficient Photocatalytic CO_2 Reduction [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421: 129968-1-129968-10.

[9] TAN S, KEE Y, WONG H, et al. Pulsed Laser Deposition of ITO Nanorods in Argon and OLED Applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 231: 98-101.

[10] ERFURT D, KOIDA T, HEINEMANN M D, et al. Impact of Rough Substrates on Hydrogen-Doped Indium Oxides for the Application in CIGS Devices [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 206: 110300-1-110300-10.

[11] GHOSH A, DWIVEDI D, GHADI H, et al. Boosted UV Sensitivity of Er-Doped In_2O_3 Thin Films Using Plasmonic Ag Nanoparticle-Based Surface Texturing [J]. Plasmonics, 2017, 13(3): 1105-1113.

[12] KERITI Y, KEFFOUS A, DIB K, et al. Photoluminescence and Photocatalytic Properties of Er^{3+}-Doped In_2O_3 Thin Films Prepared by Sol-Gel: Application to Rhodamine B Degradation under Solar Light [J]. Research on Chemical Intermediates, 2017, 44(3): 1537-1550.

[13] YE F, ZENG J J, CAI X M, et al. Doping Cuprous Oxide with Fluorine and Its Band Gap Narrowing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 721: 64-69.

[14] QIAO Z, MERGEL D. Comparison of Radio-Frequency and Direct-Current Magnetron Sputtered Thin In_2O_3∶Sn

Films [J]. Thin Solid Films, 2005, 484(1/2): 146-153.

[15] TCHENKA A, AGDAD A, VALL S, et al. Effect of RF Sputtering Power and Deposition Time on Optical and Electrical Properties of Indium Tin Oxide Thin Film [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1-14.

[16] KRISHNAN R, KAVITHA V, CHALANA R, et al. Effect of Tungsten Doping on the Properties of In_2O_3 Films [J]. JOM, 2019, 71(5): 1885-1896.

[17] KRISHNAN R, CHALANA R, SAGADEVAN S, et al. Effect of Nb Doping on the Structural, Morphological, Optical and Electrical Properties of RF Magnetron Sputtered In_2O_3 Nanostructured Films [J]. Physica Status Solidi C, 2017, 14(1/2): 1600095-1-1600095-9.

[18] JIANG F X, CHEN D, ZHOU G W, et al. The Dramatic Enhancement of Ferromagnetism and Band Gap in Fe-Doped In_2O_3 Nanodot Arrays [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2417-1-2417-6.

[19] ZHANG C, HUAN Y, YING L, et al. Low Concentration Isopropanol Gas Sensing Properties of Ag Nanoparticles Decorated In_2O_3 Hollow Spheres [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2022, 11(3): 379-391.

[20] NATH A, SARKAR B. Surface-Plasmon-Induced Ag Nanoparticles Decorated In_2O_3 Nanowires for Low Noise Photodetectors [J]. Plasmonics, 2021, 16: 37-48.

[21] DING M, XIE N, WANG C, et al. Enhanced NO_2 Gas Sensing Properties by Ag-Doped Hollow Urchin-Like In_2O_3 Hierarchical Nanostructures [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 252: 418-427.

[22] NATH A, MAHAJAN B K, SARKAR M B. Ag Nanoparticles Sheltered In_2O_3 Nanowire as a Capacitive MOS Memory Device [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2020, 19: 856-863.

[23] SUBRAHMANYAM A, BARIK K. Electrical and Optical Properties of Silver Doped Indium Oxide Thin Films Prepared by Reactive DC Magnetron Sputtering [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2006, 67(7): 1518-1523.

[24] CHO D, SHIN Y, KIM S, et al. Highly Transparent Ag Doped In_2O_3 Electrodes with High Work Function for Organic Solar Cells [J]. Current Applied Physics, 2014, 14(Suppl): S80-S83.

[25] 李桐，张林睿，杨炎翰，等. 铜锌锡硫薄膜太阳能电池吸收层的银掺杂 [J]. 材料工程，2018，46(12)：95-100. (LI T, ZHANG L R, YANG Y H, et al. Silver Doping in Absorption Layer of Copper-Zinc-Tin-Sulfur Thin Film Solar Cells [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12): 95-100.)

[26] 李秀华，张敏，杨佳，等. 薄膜厚度对射频磁控溅射 β-Ga_2O_3 薄膜光电性能的影响 [J]. 物理学报，2022，71(4)：286-297. (LI X H, ZHANG M, YANG J, et al. Effect of Film Thickness on Photoelectric Properties of β-Ga_2O_3 Films by RF Magnetron Sputtering [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(4): 286-297.)

[27] 孙辉，沈龙海，刘子童，等. 择优取向氮掺杂氧化铟薄膜的制备及其光电性能 [J]. 硅酸盐学报，2023，51(1)：145-151. (SUN H, SHEN L H, LIU Z T, et al. Preparation and Photoelectric Properties of Preferentially Oriented Nitrogen Doped Indium Oxide Films [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(1): 145-151.)

[28] POTLOG T, DUCA D, DOBROMIR M. Temperature-Dependent Growth and XPS of Ag-Doped ZnTe Thin Films Deposited by Close Space Sublimation Method [J]. Applied Surface Science, 2015, 352: 33-37.

[29] 燕音，魏鑫，帕提曼·尼扎木丁，等. Ag 掺杂 $ZnFe_2O_4$ 纳米颗粒的制备及光学气敏性能研究 [J]. 化工新型材料，2022，50(10)：112-117. (YAN Y, WEI X, NIZHAMUDING P T M, et al. Preparation and Optical Gas Sensitive Properties of Ag Doped $ZnFe_2O_4$ Nanoparticles [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(10): 112-117.)

[30] 周树仁，张红，莫慧兰，等. N 掺杂对 β-Ga_2O_3 薄膜日盲紫外探测器性能的影响 [J]. 物理学报，2021，70(17)：319-327. (ZHOU S R, ZHANG H, MO H L, et al. Effect of N Doping on the Performance of Solar Blind Ultraviolet Detector of β-Ga_2O_3 Thin Films [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(17): 319-327.)

[31] MOSTAFA Y, BADAWI A, AHMED I. Influence of Cu and Ag Doping on Structure and Optical Properties of In_2O_3 Thin Film Prepared by Spray Pyrolysis [J]. Results in Physics, 2018, 10: 126-131.

[32] CHEN K Y, HSU C C, YU H C, et al. The Effect of Oxygen Vacancy Concentration on Indium Gallium Oxide Solar Blind Photodetector [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(5): 1817-1822.

（责任编辑：王　健）