

硼镓共掺氧化锌透明电极的制备及性能优化

蒋圣楠^{1,2}, 郑 重³, 何唯一^{1,2}, 刘 涛^{1,4}, 潘秀红¹,
陈 锐¹, 郭 辉³, 高 攀⁵, 刘春俊⁶, 刘学超¹

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 功能晶体与器件全国重点实验室, 上海 201899; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049; 3. 西安电子科技大学 微电子学院, 西安 710071; 4. 上海大学 微电子学院, 上海 200444; 5. 上海电机学院 材料学院, 上海 201306; 6. 北京天科合达半导体股份有限公司, 北京 102629)

摘 要: 碳化硅(SiC)光导开关(PCSS)是一类基于超快脉冲激光调控半导体电阻率以实现导通与关断的光电器件, 在脉冲功率系统、介质壁加速器系统、超快电子学等领域具有广阔的应用前景。透明氧化物导电薄膜因其优异的透光性和导电性, 在光电器件透明电极领域具有重要应用价值。本研究采用磁控溅射法制备硼镓共掺氧化锌(Boron-gallium co-doped zinc oxide, BGZO)薄膜, 系统研究了退火温度(300~600 °C)对薄膜结构与性能的调控规律。X 射线衍射分析与霍尔效应测试结果表明, 400 °C 退火处理的薄膜呈现最优的结晶质量与光电性能, 其可见光波段透过率达 93%, 电阻率低至 $1.40 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。作为应用验证, 将优化后的 BGZO 薄膜作为透明电极集成至 SiC PCSS 器件。对比实验显示, 在 532 nm、170 mJ 脉冲激光连续触发条件下, BGZO 薄膜电极器件较传统 Ni 电极器件表现出更稳定的工作特性, 其界面丝状电流损伤减少, 电极边缘电场分布均匀性提升。本研究为制备高性能透明导电薄膜提供了优化方案, 并证实了其在 PCSS 器件中的应用优势。

关 键 词: 硼镓共掺氧化锌; 透明电极; 碳化硅; 光导开关

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)04-0479-07

Preparation and Performance Optimization of Boron-gallium Co-doped Zinc Oxide Transparent Electrodes

JIANG Shengnan^{1,2}, ZHENG Zhong³, HE Weiyi^{1,2}, LIU Tao^{1,4}, PAN Xiuhong¹,
CHEN Kun¹, GUO Hui³, GAO Pan⁵, LIU Chunjun⁶, LIU Xuechao¹

(1. State Key Laboratory of Functional Crystals and Devices, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 4. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 5. School of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 6. Tankeblue Semiconductor Co., Ltd., Beijing 102629, China)

Abstract: Silicon carbide (SiC) photoconductive semiconductor switches (PCSS) are optoelectronic devices that utilize ultrafast pulsed lasers to modulate semiconductor resistivity for switching operations. Transparent oxide

收稿日期: 2025-06-29; 收到修改稿日期: 2025-07-18; 网络出版日期: 2025-09-27

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0716304, 2022YFF0504600); 中国载人航天空间应用系统项目(KJZ-YY-NCL403)
National Key Research and Development Program of China (2021YFA0716304, 2022YFF0504600); Space Application System of China Manned Space Program (KJZ-YY-NCL403)

作者简介: 蒋圣楠(2001-), 男, 硕士研究生. E-mail: jiangshengnan23@mails.ucas.ac.cn
JIANG Shengnan (2001-), male, Master candidate. E-mail: jiangshengnan23@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 刘学超, 研究员. E-mail: xcliu@mail.sic.ac.cn
LIU Xuechao, professor. E-mail: xcliu@mail.sic.ac.cn

conductive films, especially zinc oxide thin films, are considered as a potential alternative electrode materials to reduce the on-resistance due to their excellent optical transparency and electrical conductivity. However, zinc oxide thin films are prone to ablation damage under high-energy pulsed laser irradiation, leading to crack formation and significantly affecting the device's lifespan. Additionally, uneven local electric field distribution in the electrodes poses challenges to the long-term stability of the device. In this study, boron-gallium co-doped zinc oxide (BGZO) thin films were prepared by magnetron sputtering, and effects of annealing temperature (300–600 °C) on their structural and electrical properties were investigated. X-ray diffraction and Hall effect measurements revealed that these films annealed at 400 °C exhibited optimal crystallinity and electrical performance, achieving a visible-light transmittance of 93% and a resistivity as low as $1.40 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$. After integrating the optimized BGZO films as transparent electrodes into SiC PCSS devices, these BGZO-based devices, under 532 nm wavelength and 170 mJ pulsed laser excitation, exhibited more stable operation than conventional Ni-based electrodes, with reduced filamentary current damage at the SiC-electrode interface and improved electric field uniformity at the electrode edges. This study provides an optimized fabrication strategy for high-performance transparent conductive films and confirms their advantages in PCSS applications.

Key words: boron-gallium co-doped zinc oxide; transparent electrode; silicon carbide; photoconductive semiconductor switch

脉冲功率技术通过压缩脉冲能量实现高功率、短脉冲输出,在电力电子、航空航天、医学等领域具有广泛应用,如点火装置、介质壁加速器、太赫兹安检等^[1-4]。其中,开关模块作为脉冲功率系统的核心组件,其性能对整个系统的稳定性和可靠性至关重要。理想的脉冲功率开关应具备高功率承载能力、长寿命和高重复频率等特性。光导半导体开关(Photoconductive Semiconductor Switch, PCSS, 简称“光导开关”)是一种新型半导体光电器件,其工作原理是基于超快脉冲激光调控半导体电阻率,从而实现器件的导通与关断^[5-7]。相比传统开关,PCSS 具有体积小、响应速度快、抖动小、维护便捷等优点^[8-10],在脉冲功率系统中展现出广阔的应用前景^[11-12]。碳化硅(SiC)作为第三代半导体材料,具有宽禁带宽度($\sim 3.26 \text{ eV}$)、高临界击穿场强($\sim 3 \text{ MV/cm}$)和高饱和电子漂移速率($\sim 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$)等优良特性,更加适用于高频、高压和大功率应用环境^[13-16]。此外,半绝缘 SiC 晶圆生长技术的不断发展^[17-18],进一步推动了 SiC 半导体材料在光导开关中的研究。

SiC PCSS 的电极组成及结构对其性能具有重要影响。目前,金属镍(Ni)是最常见的接触电极材料。研究表明, Ni 与 SiC 在 950~1050 °C 快速退火 1~3 min 后,可以形成良好的欧姆接触,并有效降低比接触电阻^[19-21]。此外,引入适当的非金属导电材料同样能够提升 SiC PCSS 的整体性能^[22]。Zhu 等^[23]在电极与衬底之间引入一层 n^+ -GaN 亚接触层,使 SiC PCSS 的导通电阻下降了两个数量级。透明氧化

物导电薄膜也被认为是 PCSS 电极材料的潜在选择。PCSS 中常采用具有高透光性和导电性的氧化物半导体薄膜,主要包括掺锡氧化铟(Indium Tin Oxide, ITO)、掺铝氧化锌(Aluminum-doped Zinc Oxide, AZO)以及掺锡氧化镓(Sn-doped Gallium Oxide, SGO)等。其中, AZO 因其较低的电阻率($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)而适用于光导开关的透明电极材料。Zheng 等^[24]和 Cao 等^[25]采用 AZO 作为透明电极,并结合银镜作为反射层,设计了一种新型、垂直型 4H-SiC PCSS,大幅提高了脉冲激光的利用率。然而, AZO 薄膜在高能量脉冲激光照射下容易发生烧蚀损伤,导致形成裂纹,显著影响器件寿命。同时,电极局部电场分布不均也对器件的长期稳定性构成挑战^[26-28]。因此,为了提高 PCSS 的耐压水平,降低导通电阻并延长器件寿命,进一步优化电极材料至关重要。在此背景下,本研究提出采用 BGZO 薄膜作为 PCSS 的电极接触材料,通过引入 Ga 元素来改善 ZnO 电极的耐压性能,引入 B 元素来改善电学性能,旨在评估其在高压环境下替代传统金属电极的可行性。然后通过退火工艺,改善薄膜整体的结晶性,使其具有优异的光学与电学性能。本工作聚焦于 BGZO 作为接触层和终端场板的电学性能验证,为其未来在光电集成器件中的透明电极应用奠定基础。

1 实验方法

1.1 BGZO 薄膜制备

PCSS 是一种光电耦合器件,其薄膜电极的结

晶质量及光电学性能直接影响器件的整体性能和使用寿命^[29]。本研究采用直流磁控溅射法结合高温退火工艺,制备了具有优异光电性能的 BGZO 薄膜。直流磁控溅射是一种成熟的物理气相沉积技术,具有工艺参数可控性强、靶材利用率高、沉积速率快、薄膜成分均匀性好等优点,尤其适用于金属氧化物类透明导电薄膜的制备。与热蒸发、脉冲激光沉积等其他常用方法相比,该工艺不仅具备更好的厚度控制能力和成膜均匀性,还适合大面积工业化生产。此外,磁控溅射在低基底温度下即可获得结构致密、结合力强的薄膜,为后续高温退火提供了良好的晶化基础。实验过程中,磁控溅射靶材选用 $\phi 50.8$ mm 的圆形 BGZO 陶瓷靶,其成分(质量分数)为 0.5%氧化硼(B_2O_3)、2.5%氧化镓(Ga_2O_3)和 97%氧化锌(ZnO)。在室温条件下沉积薄膜,溅射参数设定为溅射功率 80 W、工作气压 2 Pa、本底真空度 2×10^{-4} Pa、氩气流量 30 sccm (Standard Cubic Centimeter per Minute)、沉积时间 1 h。磁控溅射技术是通过惰性气体等离子体轰击靶材,使靶材原子以团簇形式溅射并沉积到衬底表面。该过程依赖物理能量传递而非化学反应,沉积粒子通常以非晶或多晶态堆积。因此,本研究制备的 BGZO 薄膜呈现择优取向的多晶结构。沉积完成后,样品在氩气环境中退火,以优化其结晶质量与光电性能。ZnO 薄膜在高温(>600 °C)下易发生热分解,导致其晶体结构和功能退化,因此本研究选择在 300~600 °C 内对 BGZO 薄膜退火 30 min。该温度区间既能有效改善薄膜的结晶性和光电性能,又可避免材料因过热而分解。

1.2 PCSS 制备

为验证 BGZO 薄膜在 PCSS 中的应用效果,在直径 4 英寸(1 英寸=2.54 cm)、厚度 500 μ m 的高纯半绝缘 SiC 衬底上制备了平面型光导开关器件。器件的制备流程包括晶圆清洗、光刻图形定义、电极沉积与器件切割,整体工艺流程与本课题组前期报道基本一致^[30]。本研究设计了两种不同的电极结构,如图 1 所示。图 1(a)为传统的 Ni/TiW/Au 金属电极体系,三层金属沉积厚度均为 100 nm。图 1(b)使用厚度为 400 nm 的 BGZO 薄膜作为接触材料,取代原金属 Ni 层,其上方继续沉积厚度为 100 nm 的 TiW 与 Au,构成 BGZO/TiW/Au 复合结构。该结构中, BGZO 薄膜间距为 1.8 mm,而金属电极间距仍为 3 mm。最后,对两种电极体系的 PCSS 进行退火处理,以优化电极与 SiC 之间的接触性能并降低接触电阻。对于 Ni 基 PCSS,采用快速退火(Rapid Thermal Annealing, RTA)工艺,在 950 °C、 N_2 气氛中快速退

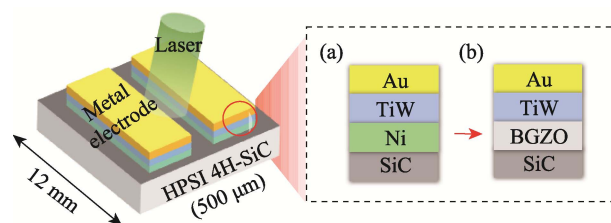


图1 SiC PCSS 电极结构图

Fig. 1 Diagrams of SiC PCSS electrode components

(a) Au/TiW/Ni/SiC; (b) Au/TiW/BGZO/SiC

火 1 min; 对于 BGZO 基 PCSS,则采用与 BGZO 薄膜制备相同的退火工艺。

1.3 测试方法

本研究采用多种测试手段对不同退火温度下制备的 BGZO 薄膜电极进行表征,以系统分析退火温度对其微观结构及光电性能的影响。利用 X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)分析 BGZO 薄膜物相,以评估退火温度对其结晶质量的影响。采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)并结合能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)表征薄膜的微观形貌及元素组成。通过紫外-可见光谱仪(UV-Vis Spectrophotometer)和椭圆偏振仪(Ellipsometer)测量 BGZO 薄膜的透过率和折射率等光学特性。利用霍尔测试(Hall Effect Measurement)系统表征薄膜的载流子浓度、迁移率及电阻率等电学性能。

本研究采用 Beamtech 公司生产的 Dawa-300 型激光器测试 PCSS 性能。测试时的激光参数如下:波长 532 nm,激光能量 170 mJ,脉冲半高宽 7 ns,激光光斑直径 3.6 mm。通过激光触发 PCSS,从而得到器件的输出特性。

2 结果与讨论

2.1 BGZO 薄膜物相与结构表征

将 BGZO 薄膜分别置于管式炉中,在 300、400、500 和 600 °C 下退火 30 min 后,薄膜的结晶质量得到进一步提升。图 2 为退火前(As-dep.)和不同退火温度下 BGZO 薄膜的 XRD 图谱。从图中可观察到,所有薄膜均呈现(0002)取向的衍射峰,且未检测到其他杂峰,表明薄膜具有较高的 c 轴择优取向性。进一步分析可见,随着退火温度的提高,(0002)衍射峰峰位由 300 °C 时的 34.06° 逐渐右移至 400 °C 时的 34.18°,并在 500 °C 时达到 34.42°,600 °C 时仅微小左移至 34.40°,表明晶格收缩效应在 500 °C 附近已基本完成,结晶性能趋于稳定。该现象主要归因于掺杂元素 B(~ 0.027 nm)和 Ga(~ 0.062 nm)的原子半径均

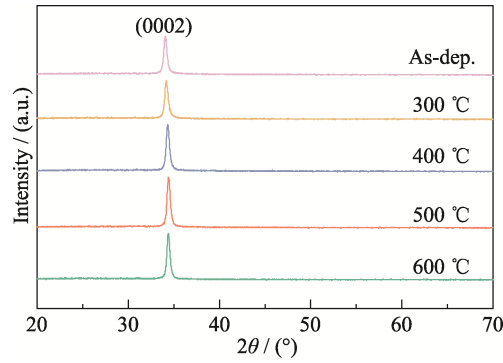


图 2 退火前和不同退火温度下 BGZO 薄膜的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of BGZO thin films before and after annealing at different temperatures

小于 Zn(~ 0.072 nm), ZnO 晶格收缩引起衍射峰峰右移。此外, 随着退火温度的提高, 薄膜内部的残余应力逐渐释放, 晶格缺陷(如空位、位错、间隙原子等)得到有效修复, 晶体结构趋于有序, 进一步导致晶格间距缩小, 最终引起 XRD 峰位右移。在退火温度达到 500 °C 时, BGZO 薄膜结晶性能相对达到最佳, 故 XRD 峰位趋于稳定。

BGZO 薄膜的微观形貌及元素组成分析结果如图 3、图 4 所示。图 3 的 EDS 结果表明, 退火前后, 薄膜各元素分布均匀。从图 4 的 SEM 照片可以观察

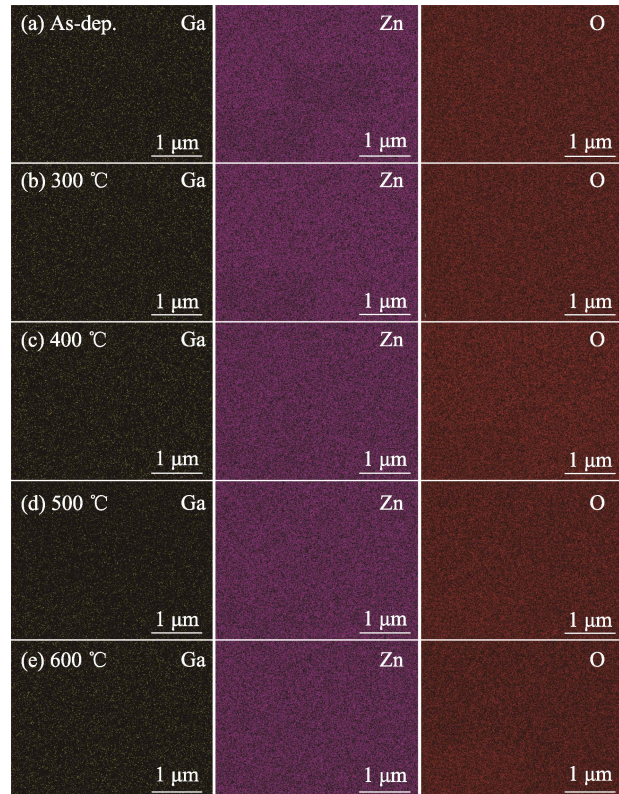


图 3 退火前和不同退火温度下 BGZO 薄膜的 EDS 测试结果
Fig. 3 EDS test results of BGZO thin films before and after annealing at different temperatures
(a) As-dep.; (b) 300 °C; (c) 400 °C; (d) 500 °C; (e) 600 °C

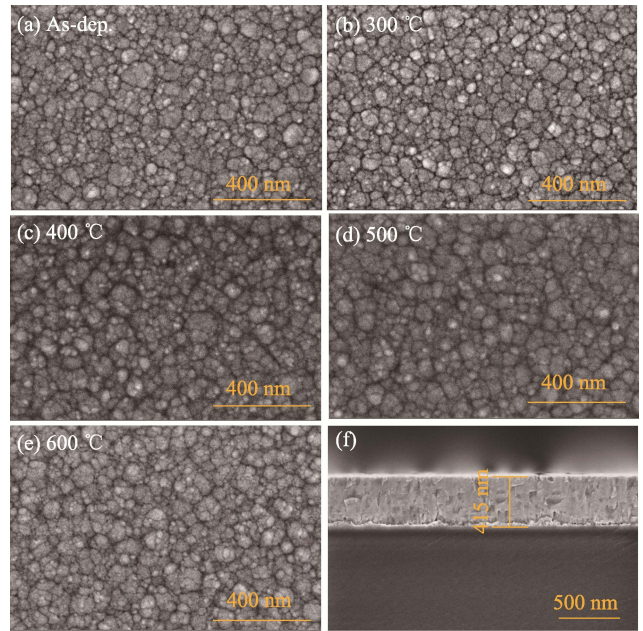


图 4 退火前和不同退火温度下 BGZO 薄膜的 SEM 照片
Fig. 4 SEM images of BGZO thin films before and after annealing at different temperatures
(a) As-dep.; (b) 300 °C; (c) 400 °C; (d) 500 °C; (e) 600 °C

到, 退火前时, 薄膜表面颗粒分布较为均匀, 且颗粒尺寸相对较小。随着退火温度的升高, 颗粒边界逐渐模糊, 并在 400 °C 以上呈现明显的晶粒长大趋势, 500 和 600 °C 退火后这一现象更加显著, 表明薄膜的结晶质量进一步提升。此外, 表 1 的 EDS 元素分析表明, Zn 由于较高的蒸汽压, 在高温退火过程中损失较为显著, 而 Ga 具有较低的蒸汽压, 相对更加稳定, 因此随着退火温度的升高, Zn/Ga 比逐渐降低。当退火温度超过 400 °C 时, 由于 Zn 和 Ga 在薄膜中的扩散、再分布、挥发及晶格稳定性变化, Zn/Ga 比趋于稳定, 表明薄膜进入成分平衡状态。

BGZO 薄膜在退火过程中的物相变化清晰展现了高温退火对其微观结构、化学成分及晶体质量的优化作用。特别是当退火温度达到 400 °C 及以上时, 薄膜的结晶质量显著提升, 晶粒趋于有序排列, 结构更加稳定, 表明高温退火在改善薄膜性能方面具有关键作用。

表 1 退火前和不同退火温度下 BGZO 薄膜 Zn/Ga 比
Table 1 Zn/Ga ratio of BGZO thin films before and after annealing at different temperatures

Temperature/°C	Zn/Ga
As-dep.	43.65
300	43.38
400	33.90
500	34.54
600	32.82

2.2 BGZO 薄膜光电性能

BGZO 薄膜的光电性能直接关系 PCSS 的性能, 其透过率结果如图 5 所示。根据 Tauc 公式, 即:

$$(\alpha h\nu)^2 = B(h\nu - E_g) \tag{1}$$

式中, E_g 为光学带隙; $h\nu$ 为光子能量; B 为比例常数; α 为吸收系数, 可通过计算透射率/反射率获得。再将 $(\alpha h\nu)^2$ 对 $h\nu$ 作图, 绘制出 Tauc 图, 结果如图 6 所示。通过外推 Tauc 曲线的线性部分至横轴即可获得 BGZO 的光学带隙 E_g , 结果列于表 2。在实际工作中通常采用 532 nm 波长的脉冲激光, 因此重点关注 500~550 nm 波段的薄膜透过率。在 400 °C 退火后, BGZO 薄膜光学透过率达到 93%, 同时光学带隙也增大至 3.43 eV。该光学测试结果与物相分析结果相吻合, 表明在 400 °C 退火条件下, 薄膜的透光性和带隙调控能力达到最佳平衡, 为其在 PCSS 中的应用提供了良好的性能基础。

BGZO 薄膜的电学性能对退火温度极为敏感, 其测试结果如表 3 所示, 当退火温度升至 400 °C 时, 薄膜的载流子浓度显著提高, 电阻率降低, 500 °C 时达到最佳状态。其中, 载流子浓度达到 $1.834 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 电阻率达到 $1.40 \times 10^{-2} \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ 。然而, 进一步提升退火

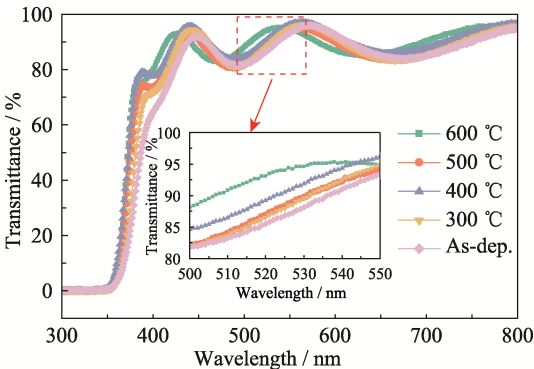


图 5 退火前和不同退火温度下 BGZO 薄膜的光学透过率
Fig. 5 Transmittance of BGZO thin films before and after annealing at different temperatures

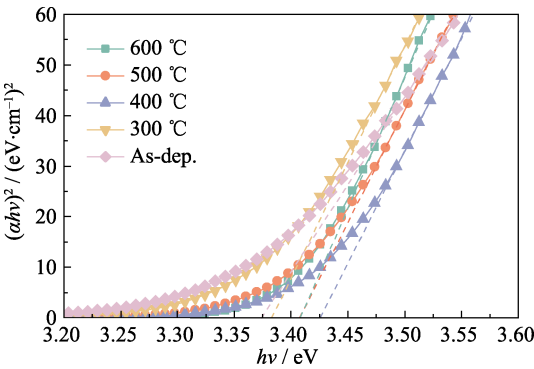


图 6 退火前和不同退火温度下 BGZO 薄膜的 Tauc 图
Fig. 6 Tauc plots of BGZO thin films before and after annealing at different temperatures

表 2 退火前和不同退火温度下 BGZO 薄膜的光学禁带宽度
Table 2 Optical bandgap of BGZO thin films before and after annealing at different temperatures

Temperature/°C	Bandgap/eV
As-dep.	3.37
300	3.38
400	3.43
500	3.41
600	3.41

表 3 不同退火温度下 BGZO 薄膜的电学性能
Table 3 Electrical properties of BGZO thin films at different annealing temperatures

Temperature/°C	Carrier concentration/ ($\times 10^{20}, \text{cm}^{-3}$)	Hall mobility/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	Resistivity/ ($\Omega \cdot \text{cm}$)
300	0.278	0.62	0.362
400	1.382	1.78	0.028
500	1.834	2.64	0.014
600	0.783	5.06	0.016

温度虽然提高了载流子迁移率, 但高温导致的 Zn 元素挥发及掺杂元素的再分布使载流子浓度反而有所下降, 从而限制了整体导电性能的进一步提升。

综合上述 BGZO 薄膜性能的表征结果, 当退火温度在 400~500 °C 时, 薄膜的结晶性、光电性能等综合性能较佳。为了减少高温对金属电极的影响, 本研究采用 400 °C 退火的 BGZO 薄膜作为透明导电电极用于制备 PCSS。

2.3 PCSS 导通特性

为评估 BGZO 薄膜作为 PCSS 接触电极材料的可行性, 在 SiC 晶片上分别制备了 BGZO 电极与金属电极两种 PCSS 器件, 并开展光导性能测试, 结果如图 7 所示。实验结果表明, 在相同的测试偏压下, 相较于传统 Ni 金属电极体系, 在引入 BGZO 薄膜后, PCSS 的输出电压峰值有所下降, 且导通电阻升高。这一现象主要源于 BGZO 薄膜与 SiC 衬底之间较高的接触势垒, 限制了载流子的有效注入。此外, 由于 BGZO 为多晶薄膜, 内部存在一定数量的陷阱态, 易于捕获部分非平衡载流子, 从而进一步增加了器件的导通电阻。

2.4 PCSS 电极微观损伤

将光电开关在 100 Hz 频率下连续触发 2000 次, 测试后发现, PCSS 电极边缘发生一定程度的损伤。为进一步分析损伤机制, 采用 SEM 对 PCSS 电极边缘进行表征分析, 结果如图 8 所示。图 8(a, b)为 Ni 基 PCSS 电极边缘形貌, 图 8(c, d)为 BGZO 基

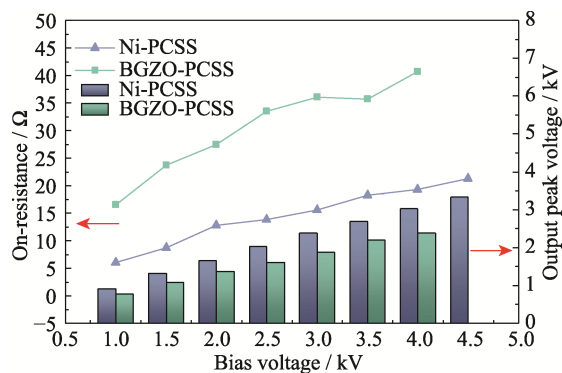


图 7 PCSS 导通特性

Fig. 7 Output characteristics of PCSS

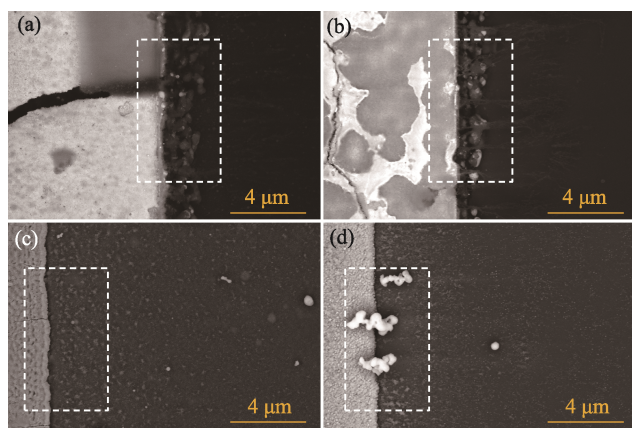


图 8 PCSS 电极边缘的 SEM 照片

Fig. 8 SEM images of PCSS electrode edge

(a) Ni-PCSS-1; (b) Ni-PCSS-2; (c) BGZO-PCSS-1; (d) BGZO-PCSS-2

PCSS 电极边缘形貌。观察发现, 在 Ni 基 PCSS 电极附近, SiC 衬底表面数微米范围内存在明显丝状放电损伤, 且该损伤仅局限于电极边缘区域。相比之下, BGZO 基 PCSS 电极边缘未见明显的电流丝状损伤。

为进一步分析丝状放电损伤的形成机理, 采用 COMSOL 软件对平面型 PCSS 电极结构进行了三维静电场分布仿真, 结果如图 9 所示。由图 9(a)的电场分布图和图 9(b)的电场在 X 轴仿真的数值变化可知, 在电极边缘会出现明显的局部高电场。在高电场作用下, 容易诱发局部电子雪崩放大过程, 从而在实际器件中表现为丝状放电损伤。此外, 相较于 BGZO 基 PCSS, Ni 基 PCSS 在形成欧姆接触过程中会伴随游离碳元素的析出, 这加剧了电场畸变, 使 Ni 基 PCSS 电极边缘更易发生局部电场集中效应, 进而促进放电损伤的形成。而 BGZO 薄膜作为亚接触层时, 由于其优异的电场均匀化能力, 可有效缓解 SiC 衬底的放电损伤, 提升 PCSS 的结构稳定性和抗损伤能力。

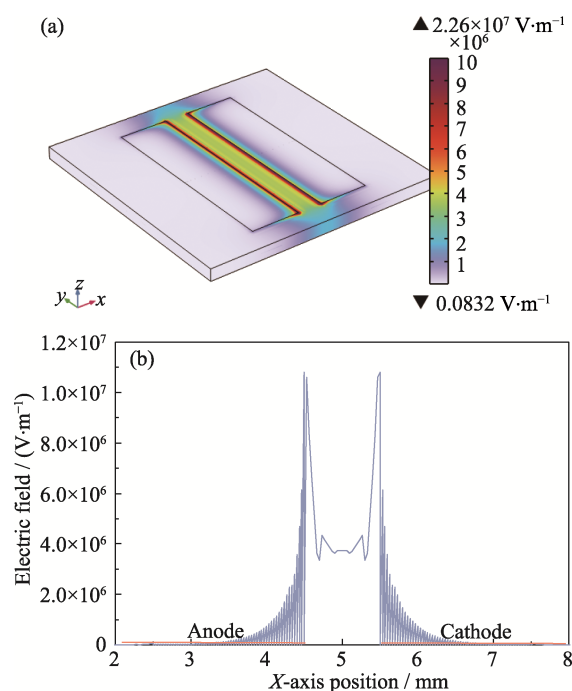


图 9 PCSS 电极边缘电场仿真

Fig. 9 Electric field simulation of electrode edge

(a) Electrode edge electric field simulation; (b) Distribution of electric field strength at the edge of simulated electrode

3 结论

本研究通过磁控溅射法结合高温退火工艺, 成功制备了具有优异光电性能的 BGZO 薄膜电极。研究表明, 当退火温度为 400 °C 时, BGZO 薄膜的综合性能达到最优。表现出 93% 的透过率和 3.43 eV 的光学带隙, 同时具备较高的载流子迁移率和较低的电阻率。在光导开关的应用验证中发现, 由于 BGZO 薄膜与 SiC 衬底之间较高的接触势垒, 相较于 Ni 基 PCSS, 其导通电阻略有提升。此外, BGZO 薄膜能够有效均匀化电极边缘的电场分布, 降低电场诱导的丝状放电损伤, 提高 PCSS 的工作稳定性并延长使用寿命。尽管本研究未直接利用其透明特性, 但材料展现出的高透过率和宽带隙特性, 体现了其在结构、电学与潜在光电集成方面的应用潜力。同时, 使用透明氧化物导电薄膜作为 PCSS 电极材料, 为 PCSS 的失效机理研究和优化提供了新的思路。

参考文献:

- [1] ZHANG D H, XU Z, CHENG G, *et al.* Strongly enhanced THz generation enabled by a graphene hot-carrier fast lane. *Nature Communications*, 2022, **13**: 6404.
- [2] HE T, YI M Y, NIU X Y, *et al.* The trade-off between microwave frequency and output power in sic photoconductive switches based

- on carrier lifetime. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2025, **72(1)**: 169.
- [3] SUN Q, WANG Y T, GUO H, *et al.* Performance of a side-gap-triggered vanadium-compensated 4H-SiC photoconductive switch. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2025, **72(6)**: 3114.
- [4] CHU X, LIU J, XUN T, *et al.* MHz repetition frequency, hundreds kilowatt, and sub-nanosecond agile pulse generation based on linear 4H-SiC photoconductive semiconductor. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, **69(2)**: 597.
- [5] MAJDA-ZDANCEWICZ E, SUPRONIUK M, PAWLOWSKI M, *et al.* Current state of photoconductive semiconductor switch engineering. *Opto-Electronics Review*, 2018, **26(2)**: 92.
- [6] FENG Z, LUAN C, XIAO L, *et al.* Performance of a novel rear-triggered 4H-SiC photoconductive semiconductor switch. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, **70(2)**: 627.
- [7] MEYERS V, VOSS L, FLICKER J D, *et al.* Photoconductive semiconductor switches: materials, physics, and applications. *Applied Sciences*, 2025, **15(2)**: 645.
- [8] MAUCH D, SULLIVAN W, BULLICK A, *et al.* High power lateral silicon carbide photoconductive semiconductor switches and investigation of degradation mechanisms. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, **43(6)**: 2021.
- [9] WANG L, JIA Y, LIU J. Photoconductive semiconductor switch-based triggering with 1 ns jitter for trigatron. *Matter and Radiation at Extremes*, 2018, **3(5)**: 256.
- [10] SULLIVAN J S, STANLEY J R. Wide bandgap extrinsic photoconductive switches. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, **36(5)**: 2528.
- [11] WANG L, CHU X, WU Q, *et al.* Effects of high-field velocity saturation on the performance of V-doped 6H silicon-carbide photoconductive switches. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, **9(4)**: 4879.
- [12] CHEN S T, XU M, LV R D, *et al.* Photon absorption effects on the transient carrier dynamics in high-purity 4H-SiC PCSS. *IEEE Electron Device Letters*, 2025, **46(2)**: 278.
- [13] YANG F, WANG Z, LIANG Z, *et al.* Electrical performance advancement in SiC power module package design with kelvin drain connection and low parasitic inductance. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, **7(1)**: 84.
- [14] WEITZEL C E, PALMOUR J W, CARTER C H, *et al.* Silicon carbide high-power devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, **43(10)**: 1732.
- [15] HUANG J, HU L, YANG X H, *et al.* Modeling and simulation of Fe-doped GaN PCSS in high-power microwave. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, **70(7)**: 3489.
- [16] ZHENG Z, JIANG S N, SUN Q, *et al.* Effects of illumination on space-charge-limited current in 4H-SiC photoconductive semiconductor switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2025, **72(8)**: 4290.
- [17] XU B J, HAN X F, XU S C, *et al.* Optimization of the thermal field of 8-inch SiC crystal growth by PVT method with "3 separation heater method". *Journal of Crystal Growth*, 2023, **614**: 127238.
- [18] FENG Z Y, XIAO L F, LUAN C B, *et al.* Dependence of conduction characteristics on compensation type and lattice structure of SiC photoconductive semiconductor switches. *Applied Optics*, 2021, **60(11)**: 3182.
- [19] CICHON S, MACHÁČ P, BARDA B, *et al.* Raman study of Ni and Ni silicide contacts on 4H- and 6H-SiC. *Thin Solid Films*, 2012, **520(13)**: 4378.
- [20] ROGOWSKI J, KUBIAK A. Investigation of microstructure and chemical composition of Ni contacts to n-type 4H-SiC. *Materials Science and Engineering: B*, 2012, **177(15)**: 1318.
- [21] ERVIN M H, JONES K A, LEE U, *et al.* Approach to optimizing n-SiC Ohmic contacts by replacing the original contacts with a second metal. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2006, **24(3)**: 1185.
- [22] XIAO L F, YANG X L, DUAN P, *et al.* Effect of electron avalanche breakdown on a high-purity semi-insulating 4H-SiC photoconductive semiconductor switch under intrinsic absorption. *Applied Optics*, 2018, **57(11)**: 2804.
- [23] ZHU K, JOHNSTONE D, LEACH J, *et al.* High power photoconductive switches of 4H SiC with Si₃N₄ passivation and n⁺-GaN subcontact. *Superlattices and Microstructures*, 2007, **41(4)**: 264.
- [24] ZHENG Z, HUANG W, HAN W W, *et al.* Analyzing the effects of aluminum-doped ZnO and Ag layers for the transparent electrode vertical PCSS. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, **67(6)**: 2414.
- [25] CAO P H, HUANG W, GUO H, *et al.* Performance of a vertical 4H-SiC photoconductive switch with AZO transparent conductive window and silver mirror reflector. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, **65(5)**: 2047.
- [26] HUANG J, HU L, MA Z Z, *et al.* Study on photoelectric efficiency and failure mechanism of high purity 4H-SiC PCSS. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, **70(11)**: 5762.
- [27] CHEN Z P, HUANG Z C, SUN Q, *et al.* Analysis of the influence of defect evolution on the performance and damage of 4H-SiC photoconductive semiconductor switches. *Journal of Applied Physics*, 2025, **137(17)**: 175706.
- [28] ZENG L L, WANG L N, NIU X Y, *et al.* Characteristics comparison of SiC and GaN extrinsic vertical photoconductive switches. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2024, **12**: 249.
- [29] HUANG W, CHANG S H, LIU X C, *et al.* Effects of substrate crystallinity on the on-state resistance of 6H-SiC photoconductive switches. *Journal of Materials Research*, 2013, **28(1)**: 38.
- [30] HAO W, LIU X C, ZHENG Z, *et al.* Performance of lateral 4H-SiC photoconductive semiconductor switches by extrinsic backside trigger. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, **39(9)**: 1070.