第 54 卷第 1 期
2026 年 1 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 1
January，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250597

$BeZnOS/Ga_2O_3$异质结薄膜制备及其作为自驱动型紫外探测器件的性能

张 腾，朱永丹，张 源，任达华，周章洋，余基映，易金桥

(湖北民族大学智能科学与工程学院，湖北 恩施 445000)

摘 要：宽禁带氧化物半导体 Ga_2O_3 与 ZnO 因其优异的光电性能和化学热稳定性备受关注。本工作创新性地将 ZnO 四元合金(BeZnOS)与 Ga_2O_3 结合，提出采用等价离子(Be^{2+}/S^{2-})复合取代、协同调制 ZnO 能带结构构筑新型高性能 $BeZnOS/Ga_2O_3$ 异质结紫外光电探测器。采用脉冲激光沉积技术成功制备II型能带排列的异质结薄膜，并通过 X 射线衍射、透射光谱、场发射扫描电子显微镜/能谱分析仪和 X 射线/紫外光电子能谱系统表征薄膜的晶体结构、光学带隙、元素分布及能带结构。结果表明：BeZnOS 呈六方纤锌矿单相(带隙 E_g = 3.3 eV)，Ga_2O_3 为单斜相(E_g = 4.5 eV)。进一步设计并开发了基于 $Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al$ 结构的紫外探测器。器件呈现典型的整流特性(整流比 1.72×10^2)，且在零偏压下实现稳定的紫外光响应，其对 240 nm 波长深紫外光的最高响应度达 23.5 mA/W，相应的探测率为 2.3×10^{11} Jones，上升/回复时间为 0.09 s/0.10 s。经分析，上述自驱动高灵敏快速光响应主要得益于 $BeZnOS/Ga_2O_3$ 异质结与 Pt/BeZnOS 肖特基结的内建电场叠加耦合效应，显著提升了载流子分离传输效率。该工作可为 ZnO 能带工程提供新思路，也为开发全氧化物高性能深紫外探测器奠定了材料基础。

关键词：宽禁带半导体；氧化物薄膜；异质结；自驱动紫外光响应
中图分类号：O469；TM23　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)01–0195–12
网络出版时间：2025–12–12

半导体材料作为数字化与智能化时代的核心基石，是支撑科技革命的底层动力。以 GaN 和 SiC 为代表的第三代宽禁带半导体材料(带隙 E_g>2.3 eV)凭借其耐高压/高温、高电子迁移率等潜在优势，有望突破传统半导体局限(Si 带隙窄~1.12 eV；GaAs 导热差)，在短波长光电子器件领域展现出广阔的应用前景。尤其在紫外探测领域，紫外光(10~400 nm)特别是日盲波段(UVC<280 nm[1])对环境监测、深空探测、导弹预警等战略应用至关重要[2–9]。传统 Si 探测器与光电倍增管受限于深紫外响应弱、体积大及复杂的工作条件，而宽禁带半导体紫外探测器因本征紫外响应与高量子效率成为该领域的重点研究对象。其中，新型宽禁带氧化物半导体 ZnO 和 Ga_2O_3 因优异的化学稳定性和出色的光电性能而备受关注。常温下，ZnO 禁带宽度约为 3.3 eV，且具有高激子束缚能、宽带隙可调性、抗辐射能力强等优点，是理想的紫外光电探测候选材料[10–12]。此外，新近兴起的 Ga_2O_3 半导体，其禁带宽度可达~4.8 eV，被视为天然的日盲紫外探测材料[13–15]。

同质 p–n 结型光电探测器通常具有响应速率快、暗电流低和击穿电压高等优势，是制备高效探测器的理想结构。对于本征 n 型 ZnO 和 Ga_2O_3，实现稳定 p 型掺杂仍是巨大挑战，主要源于受主杂质易形成深受主能级，导致空穴载流子难以被有效激活[16–18]。因此，当前研究主要集中在异质结型 ZnO 基和 Ga_2O_3 基紫外探测器。为了构筑 p–n 结，研究者采用 p 型导电的 Si、GaN 或 SiC 分别与 ZnO、Ga_2O_3 构成异质结，报道了如 p-Si/n-MgZnO[19]、p-GaN/n-MgZnO[20]、p-GaN/n-Ga_2O_3[9, 21, 22]及 p-SiC/n-Ga_2O_3[23–25]等结构的紫外探测器。然而，晶格失配导致异质外延材料质量难以控制，因此，此类器件往往难以充分发挥材料潜力，其响应度和响应速率

收稿日期：2025–08–08。　修订日期：2025–10–27。
基金项目：国家自然科学基金(12464004)；湖北省自然科学基金(2024AFD069，2025AFB307)；湖北省教育厅青年人才项目(Q20231903)；湖北民族大学校内科研项目(XN24030)。
第一作者：张 腾(1987—)，男，博士，高级实验师。
通信作者：易金桥(1979—)，男，博士，教授。

Received date: 2025–08–08.　**Revised date:** 2025–10–27.
First author: ZHANG Teng (1987–), male, Ph.D., Senior Experimentalist.
E-mail: hbmyzt@hbmzu.edu.cn
Correspondent author: YI Jinqiao (1979–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: 2014017@hbmzu.edu.cn

有待提升。更关键的是，在氧化物薄膜的高温生长工艺中，上述非氧化物 p 型半导体层容易被氧化，使其导电性出现退化。为此，Wang 等[26]设计并制备了 p-NiO/n-Ga_2O_3 全氧化物异质 p-n 结型紫外光电探测器，但器件光响应度仅达 57 μW/A，光/暗电流比为 122，探测率为 5.45×10^9 Jones。考虑到 ZnO 与 Ga_2O_3 的晶格匹配性较好，Zhao 等[27]制备了高质量 ZnO/Ga_2O_3 异质结紫外光探测器，器件在零偏压下的紫外/可见抑制比($R_{251\ nm}/R_{400\ nm}$)为 6.9×10^2，峰值响应度仅达 9.7 mA/W。由此可见，基于 ZnO/Ga_2O_3 异质结的紫外探测性能仍有提升空间。

能带工程是优化 ZnO 基器件的关键路径，通过引入晶体结构相同或相似而带隙不同的等价离子二元化合物与 ZnO 形成固溶体合金(不引入净余电荷)，是实现 ZnO 能带工程的主要策略。例如，BeO 与 ZnO 同为六角纤锌矿结构，二者形成的 BeZnO 固溶体合金理论上可实现带隙在 3.3 (ZnO)~10.6 eV (BeO)范围内的宽域调控[28–30]。然而，Ryu 等[31]和 Kim 等[32]在实验研究中发现，高 Be 含量的 BeZnO 三元合金不稳定且晶体质量差，主要归因于 Be^{2+} (~0.27 Å)与 Zn^{2+} (0.60 Å)的离子半径差异过大。ZnO 能带调控的另一种策略是通过等价阴离子取代实现，普遍采用等价 S^{2-} (1.84 Å)取代 O^{2-} (1.4 Å)形成 ZnOS 三元合金。大量实验证实，S 掺杂对 ZnO 带隙的调控呈非单调(类抛物线型)变化[33–34]，具有更加灵活的能带调制特性。同时，Persson 等[35]的理论计算表明，ZnOS 合金具有类似 ZnO 的导带而局域价带却类似于 ZnS，S 掺入主要影响 ZnO 的价带位置(可将价带顶抬高近 1 eV)。因此，本工作提出将 S 引入 BeZnO 合金形成 BeZnOS 四元合金，利用等价阳离子 Be^{2+} (小半径)与等价阴离子 S^{2-} (大半径)之间的尺寸补偿效应，有望改善晶体质量、提高 BeZnOS 合金掺杂固溶度，进而有效调制 ZnO 能带结构。

基于上述考虑，本工作尝试将能带可调的 ZnO 多元合金(BeZnOS)与 Ga_2O_3 结合，提出发展新型 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结紫外光电探测器。通过 Be、S 元素共掺杂协同调控 ZnO 合金的能带结构，旨在优化异质结能带结构，充分发挥半导体结优势，提升光生载流子的分离与传输效率，最终实现高灵敏、快速响应的紫外光探测。

1 实验

采用脉冲激光沉积(PLD)技术和自制靶材在 *c* 面蓝宝石衬底上依次制备 BeZnOS 薄膜和 Ga_2O_3 薄膜，构筑高质量的 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结，随后采用磁控溅射法在薄膜表面制备电极材料(Pt 和 Al)，以下详细介绍样品的制备工艺及其性能表征。

1.1 薄膜与器件制备

采用固相烧结法制备 BeZnOS 和 Ga_2O_3 陶瓷靶材，以阶梯式升温程序将炉温缓慢升至 1200 ℃并保温 4 h，烧结过程中通入氩气作为保护气体。薄膜沉积选用 *c* 面蓝宝石作为衬底，生长薄膜前对蓝宝石衬底进行清洗处理，以提高薄膜生长过程中的结晶质量。衬底清洗过程为：依次采用丙酮溶液、无水乙醇和超纯水进行超声波清洗(各 15 min)，随后用 N_2 吹干待用。薄膜生长过程采用 KrF 准分子激光器(美国，相干公司，Coherent COMPEX PRO 205F 型，波长：248 nm)烧蚀靶材，设置工艺参数：靶自转 5 r/min、衬底自转 10 r/min、激光脉冲频率 5 Hz 和薄膜生长时间 30 min。在衬底表面依次生长 BeZnOS 和 Ga_2O_3 薄膜，BeZnOS 薄膜生长条件：衬底温度 700 ℃，氧压 2 Pa，激光能量 350 mJ；Ga_2O_3 薄膜(用方形掩模版在 BeZnOS 表面选择性沉积)生长条件：衬底温度 650 ℃，氧压 2 Pa，激光能量 250 mJ。为了改善结晶质量，将生长的薄膜样品在富 O_2 氛围中进行原位退火处理，退火条件：退火温度 550 ℃，氧压 20 Pa，退火时间 20 min。采用磁控溅射法(室温，Ar 流量 10 sccm，气压 1.5 Pa，溅射功率 100 W)在上述 BeZnOS 和 Ga_2O_3 薄膜表面制备金属点电极(方形掩模版孔径：200 μm×200 μm，溅射时间 2 min)。其中，BeZnOS 层和 Ga_2O_3 层分别选用高功函数的金属 Pt 和低功函数的金属 Al 作为接触电极。

1.2 性能表征及测试

利用高分辨四圆 X 射线衍射仪(XRD，德国，布鲁克公司，Bruker D8 Discover 型)进行 2θ 扫描，评估薄膜的晶体结构及结晶质量。采用 X 射线/紫外光电子能谱(XPS/UPS，美国，赛默飞世尔科技公司，Thermo Scientific Escalab 250Xi 型)分析薄膜样品的成分信息和能带结构，XPS 使用 Al K_α 特征 X 射线(光子能量：1486.6 eV，光斑直径约为 100 μm)，UPS 使用 He-I 紫外光(光子能量：21.22 eV)。采用紫外–可见–近红外分光光度计(UV–Vis–NIR，日本，岛津公司，Shimadzu UV3600-plus 型)测试薄膜的透射光谱，估算相应的光学带隙。利用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM，德国，蔡司公司，Zeiss Sigma 500 型，分辨率：0.8 nm@15 kV)来观察样品的截面形貌特征，设备配有能谱分析仪(EDS)，用

以测量薄膜中元素分布。利用 Keithley 2635 数字源表(美国，泰克公司)结合探针台、电磁屏蔽暗箱测试器件的 *I*–*V* 特性。基于上述电学性能测试平台、150 W 氙灯光源、耦合单色仪(中国，武汉，卓立汉光仪器有限公司，Omni-λ3027 型)、斩波器、准直光转换器、锁相放大器及光功率校准系统(标准 Si 光电探测器)搭建探测器光电性能测试系统，系统测试器件的光/暗电流、瞬态光响应、光谱响应度曲线等性能。

2　结果与讨论

2.1　薄膜的结构、成分及光学性质

图 1 为 *c* 面蓝宝石衬底上制备 BeZnOS/Ga_2O_3 叠层薄膜的 XRD 谱。结果显示：在~34.5°处观察到强衍射峰，对应 BeZnOS 的(002)晶面(JCPDS 36-1451)，表明薄膜生长沿 *c* 轴的高度择优取向。同时，~73.8°处出现的次级峰归属于(004)晶面，符合六方纤锌矿结构特征(空间群 $P6_3mc$)。在 38.2°和 58.9°处分别检测到 β-Ga_2O_3 的($\bar{4}02$)和($\bar{6}03$)晶面衍射峰(JCPDS 41-1103)，与单斜相 β-Ga_2O_3 标准卡片一致(空间群 $C2/m$)。值得注意的是，所有特征峰均未出现明显的峰位偏移且无杂相峰出现，表明 PLD 沉积的 BeZnOS 和 Ga_2O_3 薄膜分别为单相六方纤锌矿结构和单斜晶相。

图 2a 中 BeZnOS/Ga_2O_3 叠层薄膜的断面形貌清晰地揭示了薄膜的厚度分布：BeZnOS 层厚度为 212 nm，Ga_2O_3 层为 165 nm。基于此结构特征，图 2b 的紫外–可见透射光谱(检测范围 200~800 nm)显示 2 个特征吸收边：在 365 nm 处出现陡峭吸收边，对应 BeZnOS 的本征吸收；在 275 nm 处呈现更高能

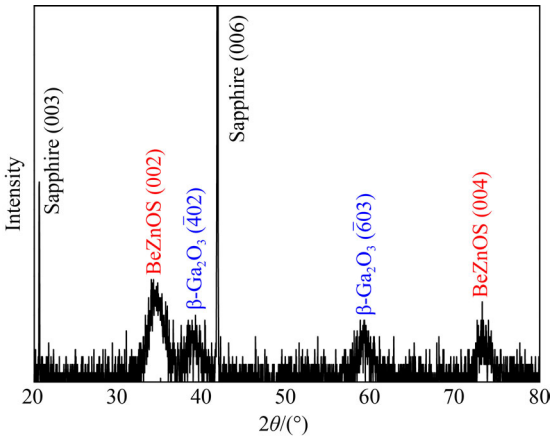


图 1　BeZnOS/Ga_2O_3 叠层薄膜样品的 XRD 谱
Fig. 1　XRD pattern of BeZnOS/Ga_2O_3 stacked thin films

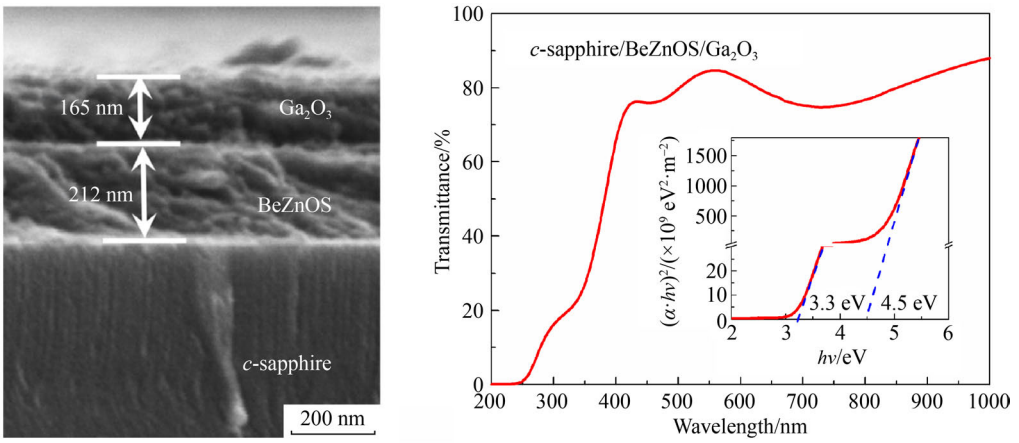
级吸收边，则归属为 Ga_2O_3 的光学跃迁。根据直接带隙半导体材料光学带隙(E_g)的 Tauc 方程[36–37]：

$$(\alpha \cdot h\nu)^2 = C(h\nu - E_g) \quad (1)$$

其中：α 为吸收系数；C 为常数；$h\nu$ 为入射光子能量。

对图 2b 插图中的$(\alpha h\nu)^2$–$h\nu$ 关系曲线进行线性外推(α=0，外推直线与横轴交点坐标 $h\nu$)，估算出 BeZnOS 合金薄膜和 Ga_2O_3 薄膜的光学带隙分别为 3.3 eV 和 4.5 eV。

为解析 BeZnOS 四元合金薄膜的元素组成及化学态，对其进行了 X 射线光电子能谱表征。如图 3 所示，样品中仅检测到 Be、Zn、O、S 元素的特征峰，表明无杂质元素存在。进一步采集 Be 1s、Zn 2p、O 1s 和 S 2p 原子轨道的高分辨精细谱(如图 4 所示)。图 4a 为 O 1s 谱图，经高斯拟合分解为双峰，光电子峰结合能分别位于 530.6 eV (O_I)和 532.5 eV (O_{II})。根据文献[38–39]报道，O_I来源于晶格氧而 O_{II}来源于表



(a) Cross-sectional FE-SEM image　　(b) Transmission spectrum with $(\alpha \cdot h\nu)^2$ *vs.* $h\nu$ plot

图 2　BeZnOS/Ga_2O_3 叠层薄膜的厚度及光学性质
Fig. 2　Thickness and optical properties of BeZnOS/Ga_2O_3 stacked films

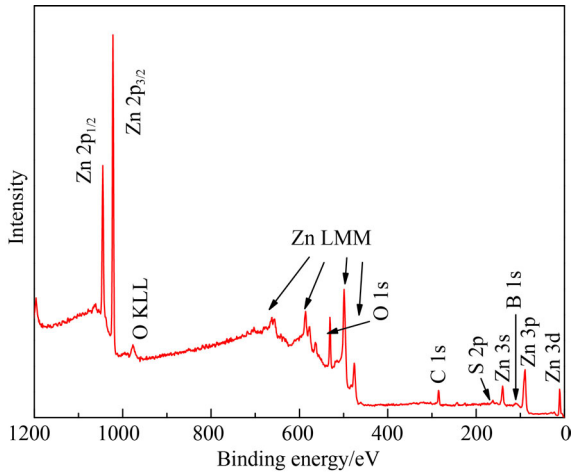


图 3 BeZnOS 四元合金薄膜的 XPS 谱

Fig. 3 XPS survey spectra of BeZnOS quaternary alloy thin film

面吸附氧。图 4b 中的 S 2p 谱呈现明显的双峰结构(S $2p_{1/2}$：~163.5 eV，S $2p_{3/2}$：~161.8 eV)，其结合能较硫单质结合能特征峰(S^0 $2p_{1/2}$：165.18 eV，S^0 $2p_{3/2}$：164 eV)显著负移，暗示硫元素以 S^{2-}价态进入 ZnO 晶格[40]。图 4c 所示 Be 1s 光电子特征峰位于~114 eV，其结合能显著高于金属 Be (~111 eV)，该结果符合 Be—O 键合特征，且与 Park 等[41]和 Su 等[42]在 BeZnO 合金体系中的观测一致。此外，纯 ZnO 和 ZnS 中的 Zn $2p_{3/2}$ 结合能分别为~1020.4 eV 和~1022.4 eV[39]，而图 4d 所示样品 BeZnOS 的 Zn $2p_{3/2}$ 的结合能刚好位于二者之间(~1021.7 eV)，暗示 Zn^{2+}处于 O^{2-}和 S^{2-}的化学环境之中。综上分析，表明 Be 原子和 S 原子均以替位方式掺入 ZnO 晶格，形成 BeZnOS 四元合金。基于各元素的精细谱，采用灵敏度因子法计算合金薄膜中的各元素原子百分比，获得 Be、S 的摩尔分数分别为 6%和 23%。

进一步借助 EDS 谱分析样品中各元素的空间分布，沿薄膜截面法线方向(图 5a 箭头所示)进行 EDS 线扫描以获得各元素的相对含量，进而获得 Al、O、S、Zn 和 Ga 元素的面分布图。如图 5a 所示，各元素呈现清晰的分层分布。图 5a 中 Al 和 O 元素含量分布最高的位置对应面蓝宝石(衬底层，Al_2O_3)，Zn 和 S 元素则主要富集在靠近衬底层的区

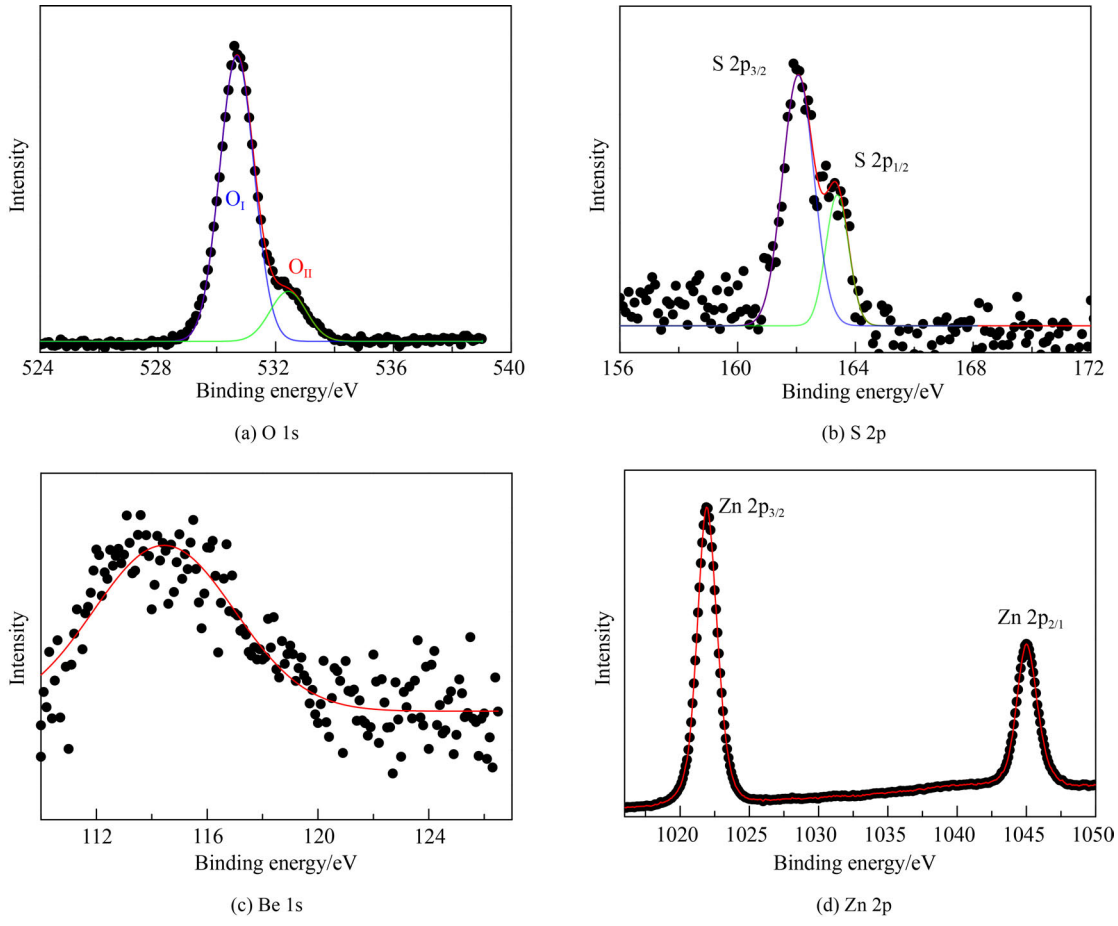
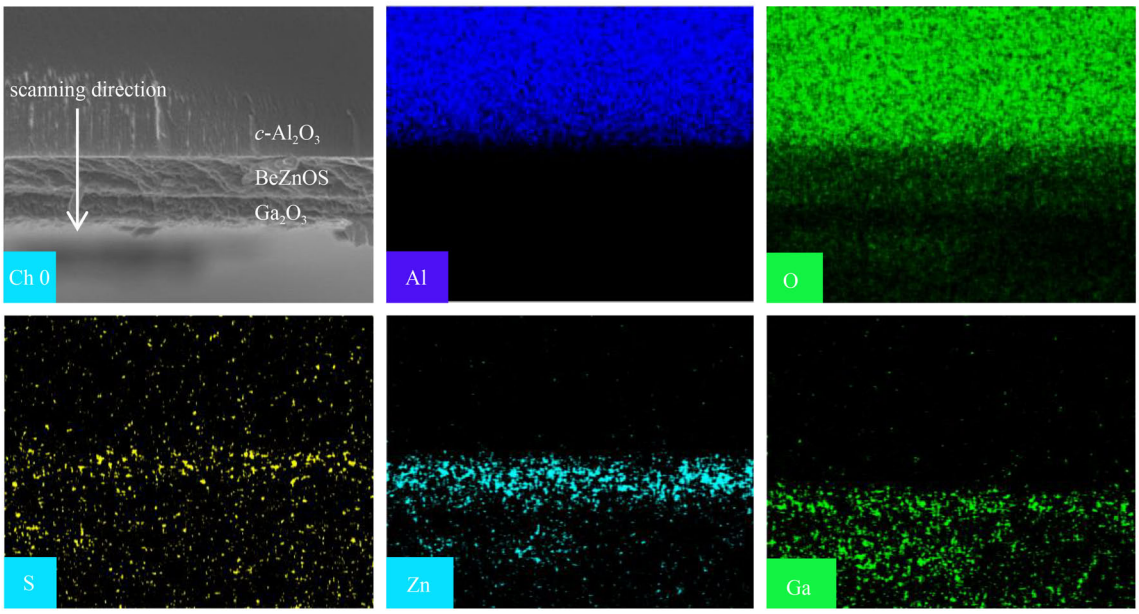
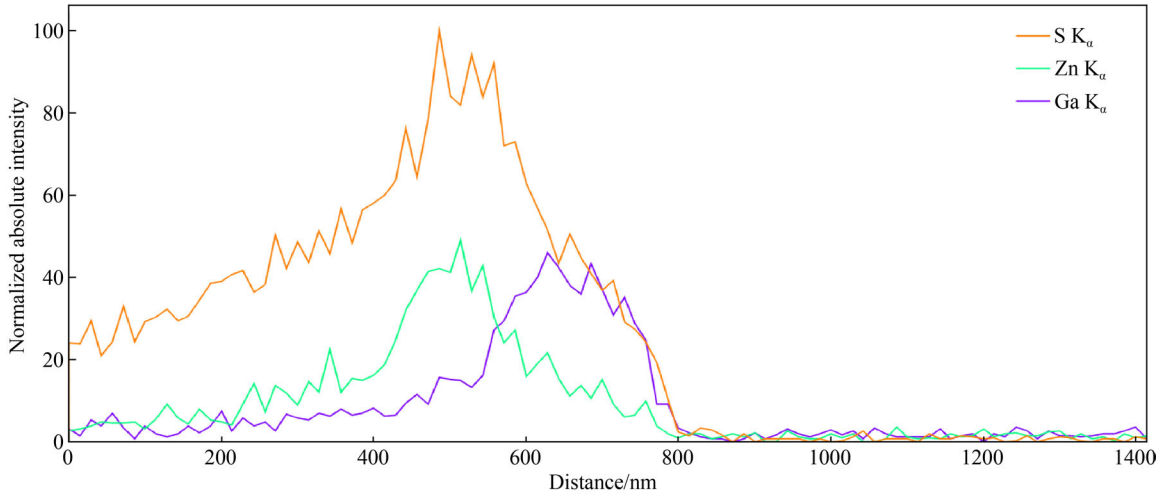


图 4 BeZnOS 四元合金薄膜的 XPS 精细谱

Fig. 4 XPS high-resolution spectra of BeZnOS quaternary alloy thin film



(a) EDS elemental line scan



(b) Characteristic X-ray profiles of S, Zn, and Ga

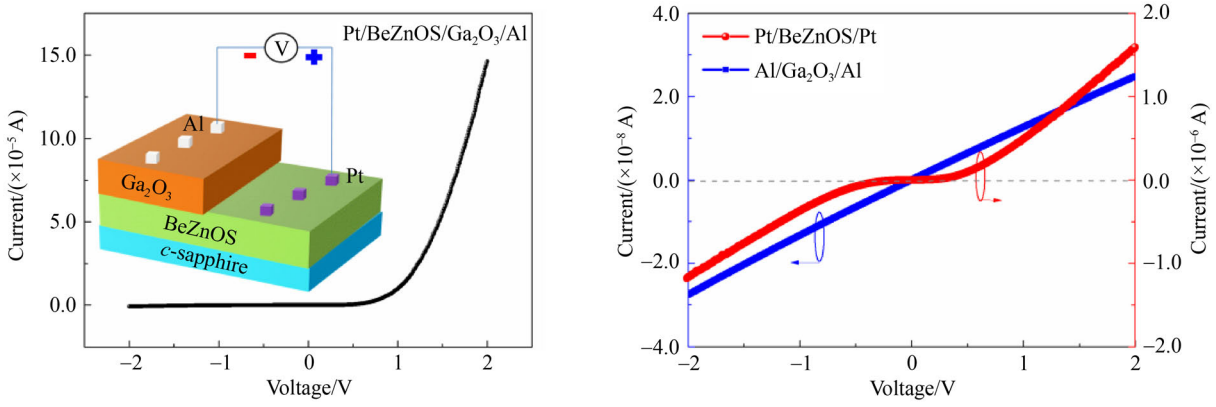
图 5　样品中的元素分布

Fig. 5　Elemental distribution of the sample

域(第 1 层，BeZnOS)，而 Ga 元素集中分布在靠近 Zn、S 元素层的区域(第 2 层，Ga_2O_3)。此外，从图 5b 中 S、Zn 和 Ga 元素的特征 X 射线强度可以看到，S 和 Zn 元素主要分布在 300~600 nm 的区间(相对位置)，而 Ga 元素主要分布在 580~800 nm 的区间(相对位置)，BeZnOS/Ga_2O_3 界面区域各元素呈渐变分布，表明异质结界面处存在原子互扩散。

2.2　器件的紫外光探测性能

为探究 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结的光电特性与应用潜力，本工作进一步构筑了 Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al 自驱动紫外光电探测器，器件结构如图 6a 中插图所示。暗态条件下的电流–电压(I–V)特性曲线(图6a)呈现显著的非对称整流行为：正向偏压(+2 V，Pt 端为正)电流达 1.46×10^{-4} A，反向偏压(–2 V，Pt 端为负)泄漏电流为 8.47×10^{-7} A。根据整流比的定义[43]，计算器件的整流比高达 1.72×10^{2}，暗示器件内部存在结效应。为了解析界面接触性质，分别测试了 Al/BeZnOS/Al 和 Pt/Ga_2O_3/Pt 单层器件的 I–V 特性，如图 6b 所示。结果表明，Al/Ga_2O_3 界面形成理想欧姆接触，而 Pt/BeZnOS/Pt 呈现显著非线性特征，证实 Pt/BeZnOS 界面存在肖特基势垒。为了验证上述结效应，以下重点考察 BeZnOS/Ga_2O_3 基器件在零偏压(0 V)条件下的自驱动紫外光探测性能。



(a) *I–V* curve of Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al (b) *I–V* curves of Pt/BeZnOS/Pt and Al/Ga_2O_3/Al

图 6 器件结构示意图及 *I–V* 特性曲线

Fig. 6 Schematic structure and *I–V* characteristics of the devices

光响应度(R_λ，单位：A/W)和探测率(D^*，单位：cm·$Hz^{1/2}$/W，Jones)是评价光电探测器光敏特性和光探测能力的重要参数。对于特定入射波长λ的光响应度 R_λ，满足式(2)[44–45]：

$$R_\lambda=(I_{light}-I_{dark})/P_\lambda \cdot S \quad (2)$$

其中：I_{light} 和 I_{dark} 分别为光照与暗态电流；P_λ为入射光功率密度(单位：mW/cm^2)；S 为有效光敏面积。当暗电流以散粒噪声和热噪声为主导时，探测率可被描述为[46–47]：

$$D^*=R_\lambda/(2eJ_d)^{1/2} \quad (3)$$

其中：J_d 为暗电流密度($J_d = I_{dark}/S$)；e 为电子电荷(1.602×10^{-19} C)。

如图 7 所示，该器件在零偏压下表现出显著的本征波长选择性，其对紫外波段(200~ 400 nm)的光响应度高于可见光波段(400~600 nm)。器件的光响应度峰值分布于 UVC 波段(200~280 nm，日盲紫外光)和 UVA 波段(320~400 nm)，分别对应于 Ga_2O_3 和 BeZnOS 半导体层的本征光吸收，呈现出双谱峰响应的紫外光探测特性。在日盲紫外区，器件实现峰值光响应度 $R_{240\ nm}$=23.5 mA/W，探测率 D^*值为 2.3×10^{11} Jones，紫外可见抑制比($R_{240\ nm}/R_{400\ nm}$)达 1.06×10^3。

进一步测试器件的瞬态光响应特性，利用氙灯、单色仪和机械斩波器构建周期性调制紫外光(波长：250 nm，光功率密度：0.48 mW/cm^2)，获得 0 V 偏压条件下的电流–时间(*I–t*)响应曲线如图 8a 所示。经连续多周期的紫外光开/关交替切换，器件的光/暗电流均能快速达到稳态，呈现快速和稳定的光响应，证实了器件的自驱动能力。上述稳定的自驱动光响应特性，表明 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结界面结构具有良好稳定性，这主要归因于化学键合主导的界面结合作用。光响应速率反映了器件的瞬态响应过程，响应时间可通过上升时间(τ_r)和回复时间(τ_d)定量表征。一般而言，τ_r 和 τ_d 分别被定义为光电流从暗态值增大至最大值的 90%和关闭光照时电流减小至最大值的 10%的所需时间[47]。如图 8b 所示，对单个周期的 *I–t* 曲线进行归一化处理，获得器件的响应时间为：τ_r=0.09 s 和 τ_d=0.1 s。

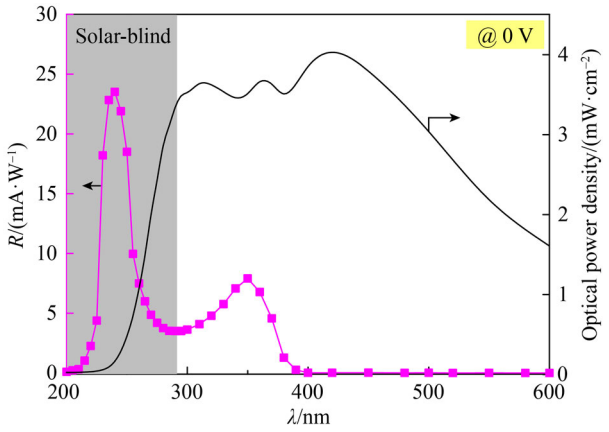
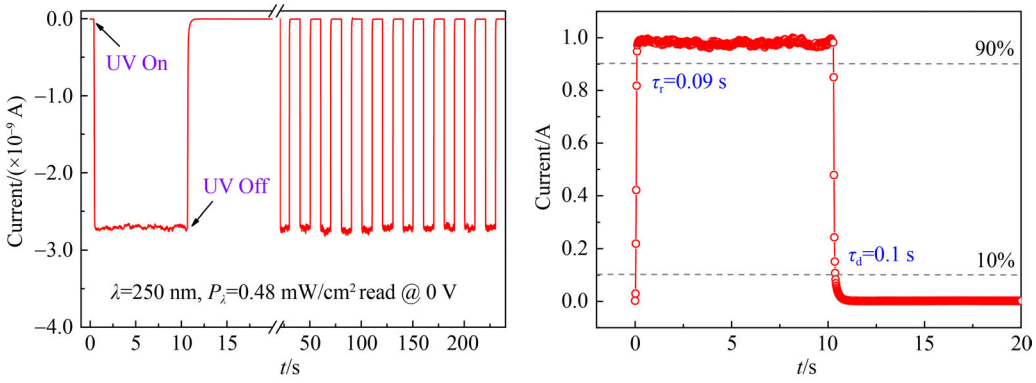


图 7 光谱响应度(R)和入射光功率密度随波长的变化关系曲线

Fig. 7 Spectral responsivity (R) and incident power density *versus* wavelength

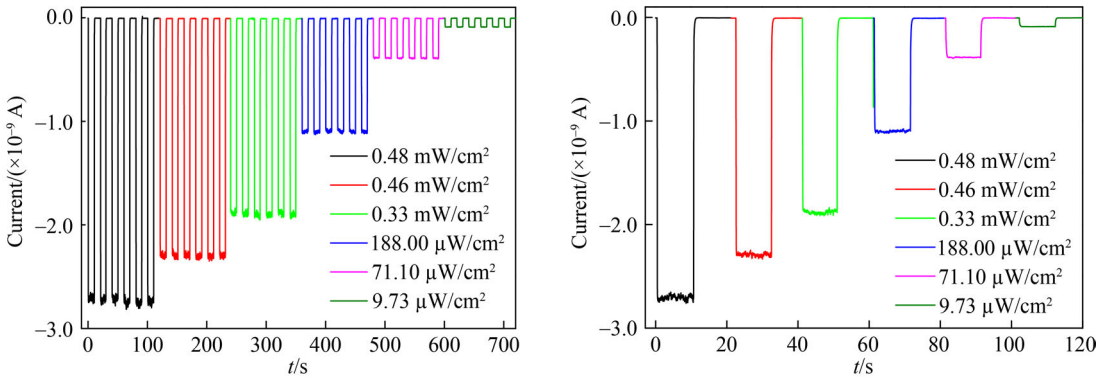
为探究器件的光强依赖性，系统测试了不同入射光功率密度(P_λ：9.73 μW/cm^2~0.48 mW/cm^2)下的瞬态光响应特性。如图 9 所示，不同光照强度下的器件仍表现出快速、稳定的自驱动光响应特性。光电流($I_{ph}=I_{light}-I_{dark}$)随 P_λ增大呈亚线性增长(满足：$I_{ph}\propto P_\lambda^{0.89}$)，而响应度则随 P_λ升高而下降(满足：$R_\lambda\propto P_\lambda^{-0.1}$)，符合典型的光电导增益模型，表明在弱光条件下具有更高的灵敏度(见图 10)。通过单周期 *I–t* 曲线归一化



(a) Current–time curve　　(b) Normalized current–time curve

图 8　Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al 紫外光探测器的 *I–t* 特性和归一化 *I–t* 曲线

Fig. 8　Time-dependent photoresponse (*I–t*) curve and normalized *I–t* curve of Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al detector



(a) Multi-cyle photoresponse under different $P_λ$　　(b) Single-cyle photoresponse underdifferent $P_λ$

图 9　不同入射光功率($P_λ$, λ=250 nm)器件的 *I–t* 特性

Fig. 9　*I–t* characteristics under varied incident power densities ($P_λ$, λ=250 nm)

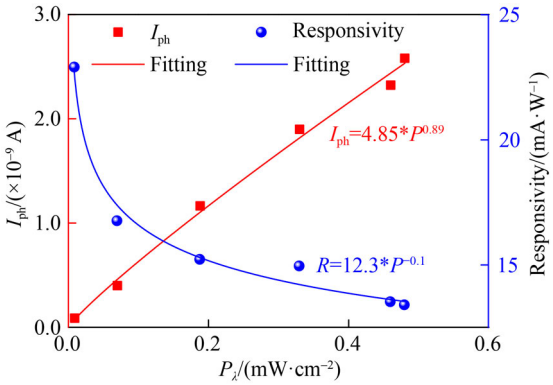


图 10　器件的光电流(I_{ph})和光响应度随入射光光功率的变化关系曲线

Fig. 10　Photocurrent (I_{ph}) and responsivity *versus* incident optical power

分析(见图 11)，发现响应速率与入射光强相关：光响应速率随光照强度增加而提升，随 $P_λ$增大器件的上升时间τ_r从 0.36 s 下降至 0.09 s、回复时间τ_d从 0.46 s 下降至 0.1 s。该现象源于缺陷辅助载流子复合动力学机制[48–49]：在弱光条件下，缺陷相关的深能级陷阱中心通过俘获/释放载流子产生持续光电导效应(PPC)，延长弛豫过程；而在强光条件下，光生载流子浓度超过陷阱态饱和阈值，显著抑制载流子复合时间，从而加速载流子复合。

将上述 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结器件的紫外探测性能与文献中报道的自驱动型 Ga_2O_3 基异质结薄膜探测器结果进行性能对比，如表 1 所示。在零偏压条件下，本工作设计制备的新型 BeZnOS/Ga_2O_3 紫外光探测器具有优良的综合性能，上述结果可为开发高性能 Ga_2O_3 基异质结型自驱动紫外光探测器提供有价值的参考。

2.3　器件的自驱动光响应机制

为阐明器件的自驱动光电响应机制，进一步通过紫外光电子能谱深入分析薄膜表面的价电子结构。如图 12a 所示，经费米能级校准后测试获得 BeZnOS 和 Ga_2O_3 薄膜的价带谱。对能谱曲线采用线性外推法可得(E_v – E_f)值和功函数 φ，其中 E_v 和 E_f 分别代表价带顶能级和费米能级。因此，BeZnOS 和 Ga_2O_3

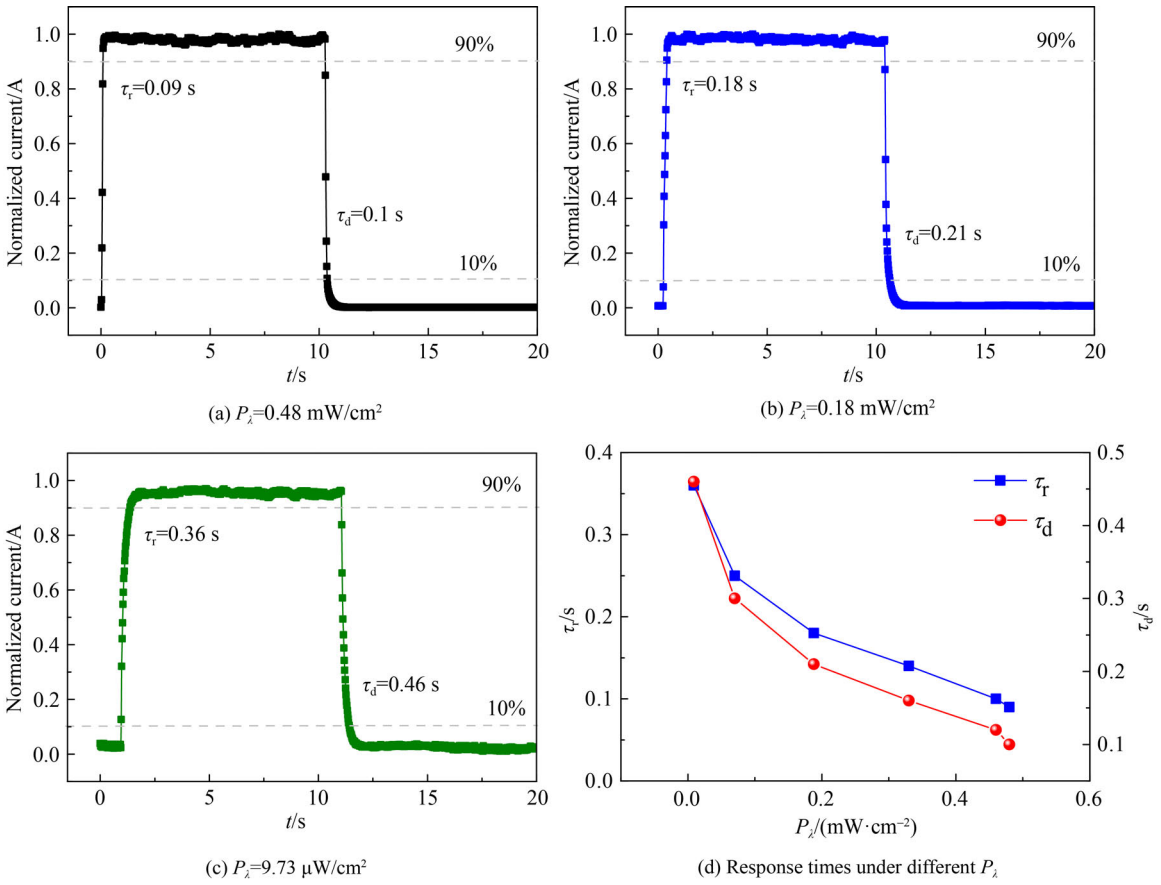


图 11 不同入射光功率密度条件下器件的归一化 *I*–*t* 曲线及上升/回复时间(τ_r/τ_d)

Fig. 11 Normalized *I*–*t* curves and rise/decay times (τ_r/τ_d) at different power densities

表 1 与文献中报道的 Ga_2O_3 基异质结型紫外光探测器性能参数的对比(@ 0 V)

Table 1 Performance comparison of Ga_2O_3-based heterojunction UV photodetectors at zero bias

Device	I_{light}/I_{dark}	R/(mA·W^{-1})	D*/Jones	τ_r	τ_d	Refs.
α-Ga_2O_3/β-Ga_2O_3	1.22×10^2	0.26	2.80×10^{10}	0.54 s/3.32 s	1.63 s/6.79 s	[50]
SiC/β-Ga_2O_3	1.65×10^3	10.35	8.80×10^9	0.011 s	0.019 s	[25]
ZnO/β-Ga_2O_3	6.90×10^2	9.70		0.1 ms	0.9 ms	[27]
Diamond/β-Ga_2O_3	2.42×10^2	0.20	6.90×10^9			[51]
Ga:ZnO/β-Ga_2O_3	1.27×10^2	0.76		0.179 s	0.272 s	[52]
MoS_2/β-Ga_2O_3	6.70×10^2	2.05	1.21×10^{11}			[53]
GaN/β-Ga_2O_3	1.52×10^2	54.43	1.23×10^{11}	0.1 s	0.08 s	[22]
BeZnOS/β-Ga_2O_3	2.21×10^2	23.50	2.30×10^{11}	0.09 s	0.1 s	This work

二次电子截止边 E_{cutoff} 分别为 13.8 eV 和 15.2 eV，($E_v - E_f$)分别为 2.9 eV 和 3.6 eV。相应薄膜的功函数 φ 可利用式(4)[54]计算：

$$\varphi = h\nu - E_{cutoff} \quad (4)$$

其中：$h\nu$ = 21.22 eV。确定薄膜的费米能级位置后，结合前面利用透射光谱法所定的薄膜光学带隙 E_g 值[E_g(BeZnOS)=3.3 eV，E_g(Ga_2O_3)=4.5 eV]，进而确定薄膜的 E_c(导带顶能级)和 E_v，最终获得以真空能级为基准的 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结能带结构。如图 12b 所示，BeZnOS 导带和价带位置均低于 Ga_2O_3 形成梯度差(ΔE_c=1.9 eV，ΔE_v=0.7 eV)，表明 BeZnOS 和 Ga_2O_3 半导体之间形成 Type-II型能带结构(交错型能带排列)[55]。此类型能带排列可有效抑制电子–空穴复合，驱动光生电子向 Ga_2O_3 层迁移、空穴向 BeZnOS 层迁移，提高光生电子–空穴的分离效率，此为器件实现高效自驱动光响应的核心物理机制。

基于前述电学表征，Pt/BeZnOS 界面形成肖特基接触，而 Al/Ga_2O_3 界面呈欧姆接触(对光生载流

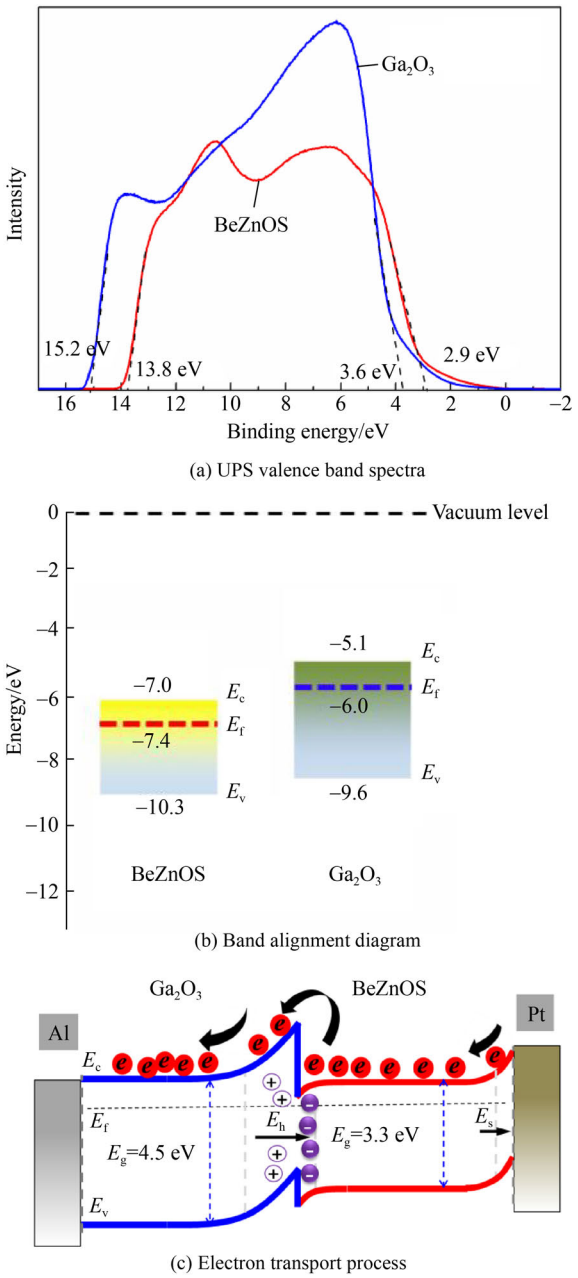


图 12　器件的能带结构和工作机理

Fig. 12　Band structure and underlying mechanism of the fabricated device

子分离无贡献)，故器件内建电场 E_{in} 由 Pt/BeZnOS 肖特基结(E_s)和 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结(E_h)贡献。如图 12c 能带结构示意图所示，二者电场方向相同(E_s||E_h)，形成协同增强效应($E_{in}=|E_h+E_s|$)。该强内建电场可在零偏压下驱动光生载流子定向分离：电子受 E_s 作用穿过 Pt/BeZnOS 肖特基势垒，在 E_h 作用下经 BeZnOS 导带注入 Ga_2O_3 导带，空穴则在价带反方向传输。其中，异质结界面产生的势阱对器件的光电性能影响较小，这主要源于II型能带结构高效的载流子定向分离能力，以及与肖特基结形成的协同增强效应，使得光生载流子在被俘获前被内部电场有效分离和传输，界面势阱对载流子输运的负面影响被有效抑制。载流子渡越时间 τ_{trans} 由式(5)主导[56]：

$$\tau_{trans}=s^2/\mu V_{bi} \tag{5}$$

其中：s 为电极间距；μ为载流子迁移率；V_{bi} 为等效偏压(内建电势)。

得益于上述肖特基结和异质结双结电场耦合叠加效应(等价于增加内建电势)，促进光生载流子的高效分离传输，最终实现无外部偏压条件下高灵敏快速光响应。

3　结论

采用脉冲激光沉积技术在 c 面蓝宝石衬底上成功制备 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结薄膜，XRD 分析表明 BeZnOS 四元合金薄膜呈六方纤锌矿单相，Ga_2O_3 薄膜为单斜 β 相。紫外–可见透射光谱显示双吸收边特征，利用 Tauc 法则获得 BeZnOS 和 Ga_2O_3 的光学带隙分别为 3.3 eV 和 4.5 eV。基于此异质结构，设计开发了 Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al 自驱动型紫外探测器。器件 I–V 曲线呈典型的整流特性，整流比达 1.72×10^2。在零偏压下，器件分别在 UVC 和 UVA 波段呈现双响应峰，最高响应度达 23.5 mA/W (λ= 240 nm)，相应的探测率为 2.3×10^{11} Jones，响应时间为：$\tau_r=0.09$ s，$\tau_d=0.10$ s。器件光响应特性表现出显著的光强依赖性：在弱光条件下表现出更高的响应度但更慢的响应速率，在强光条件下表现出较低的响应度但更快的响应速率。这主要源于深能级陷阱态的载流子饱和效应，高光强使陷阱中心被填满，抑制持续光电导弛豫过程。薄膜表面价电子结构分析证实 BeZnOS/Ga_2O_3 异质结形成II型能带排列，其与 Pt/BeZnOS 肖特基结内建电场同向耦合形成增强电场以促进光生载流子分离传输，最终实现高灵敏与快速响应的自驱动探测特性。该研究为全氧化物异质结深紫外探测器提供了创新性的双结协同调控策略，在日盲紫外探测领域具有重要应用前景。

参考文献:

[1] CHEN X H, REN F F, GU S L, et al. Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. Photon Res, 2019, 7(4): 381–415.

[2] 张腾, 张源, 任达华, 等. Pt/Ga_2O_3/Nb: $SrTiO_3$ 光电器件的自驱动光响应及阻变效应[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(1): 161–169.
ZHANG Teng, ZHANG Yuan, REN Dahua, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(1): 161–169.

[3] XIE C, LU X T, TONG X W, et al. Recent progress in solar-blind deep-ultraviolet photodetectors based on inorganic ultrawide bandgap semiconductors[J]. Adv Funct Mater, 2019, 29(9): 1806006.

[4] KIM S, KIM J. Highly selective ozone-treated β-Ga_2O_3 solar-blind deep-UV photodetectors[J]. Appl Phys Lett, 2020, 117(26): 261101.

[5] FANG H J, ZHENG C, WU L L, et al. Solution-processed self-powered transparent ultraviolet photodetectors with ultrafast response speed for high-performance communication system[J]. Adv Funct Mater, 2019, 29(20): 1809013.

[6] BAO C X, YANG J, BAI S, et al. High performance and stable all-inorganic metal halide perovskite-based photodetectors for optical communication applications[J]. Adv Mater, 2018, 30(38): 1803422.

[7] HAN W, LI C, YANG S J, et al. Atomically thin oxyhalide solar-blind photodetectors[J]. Small, 2020, 16(23): 2000228.

[8] PAMMI S V N, MADDAKA R, TRAN V D, et al. CVD-deposited hybrid lead halide perovskite films for high-responsivity, self-powered photodetectors with enhanced photo stability under ambient conditions[J]. Nano Energy, 2020, 74: 104872.

[9] HE T, ZHANG X D, DING X Y, et al. Broadband ultraviolet photodetector based on vertical Ga_2O_3/GaN nanowire array with high responsivity[J]. Adv Opt Mater, 2019, 7(7): 1801563.

[10] LIU K W, SAKURAI M, AONO M. ZnO-based ultraviolet photodetectors[J]. Sensors, 2010, 10(9): 8604–8634.

[11] YANG J L, LIU K W, SHEN D Z. Recent progress of ZnMgO ultraviolet photodetector[J]. Chin Phys B, 2017, 26(4): 047308.

[12] XU Z X, ZHANG Y L, WANG Z N. ZnO-based photodetector: From photon detector to pyro-phototronic effect enhanced detector[J]. J Phys D Appl Phys, 2019, 52(22): 223001.

[13] QIN Y, LONG S B, DONG H, et al. Review of deep ultraviolet photodetector based on gallium oxide[J]. Chin Phys B, 2019, 28(1): 018501.

[14] TAK B R, GARG M, DEWAN S, et al. High-temperature photocurrent mechanism of β-Ga_2O_3 based metal-semiconductor-metal solar-blind photodetectors[J]. J Appl Phys, 2019, 125(14): 144501.

[15] YU J, WANG Y H, LI H R, et al. Tailoring the solar-blind photoresponse characteristics of β-Ga_2O_3 epitaxial films through lattice mismatch and crystal orientation[J]. J Phys D Appl Phys, 2020, 53(24): 24LT01.

[16] JANOTTI A, VAN DE WALLE C G. Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor[J]. Rep Prog Phys, 2009, 72(12): 126501.

[17] TSAO J Y, CHOWDHURY S, HOLLIS M A, et al. Ultrawide-bandgap semiconductors: Research opportunities and challenges[J]. Adv Electron Mater, 2018, 4(1): 1600501.

[18] FAN J C, SREEKANTH K M, XIE Z, et al. P-Type ZnO materials: Theory, growth, properties and devices[J]. Prog Mater Sci, 2013, 58(6): 874–985.

[19] LIANG H L, MEI Z X, ZHANG Q H, et al. Interface engineering of high-Mg-content MgZnO/BeO/Si for p-n heterojunction solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. Appl Phys Lett, 2011, 98(22): 221902.

[20] ZHU Y X, LIU K W, AI Q, et al. A high performance self-powered ultraviolet photodetector based on a p-GaN/n-ZnMgO heterojunction[J]. J Mater Chem C, 2020, 8(8): 2719–2724.

[21] GUO D Y, SU Y L, SHI H Z, et al. Self-powered ultraviolet photodetector with superhigh photoresponsivity (3.05 A/W) based on the GaN/Sn: Ga_2O_3 pn junction[J]. ACS Nano, 2018, 12(12): 12827–12835.

[22] LI P G, SHI H Z, CHEN K, et al. Construction of GaN/Ga_2O_3 p–n junction for an extremely high responsivity self-powered UV photodetector[J]. J Mater Chem C, 2017, 5(40): 10562–10570.

[23] NAKAGOMI S, MOMO T, TAKAHASHI S, et al. Deep ultraviolet photodiodes based on β-Ga_2O_3/SiC heterojunction[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(7): 072105.

[24] NAKAGOMI S, SAKAI T, KIKUCHI K, et al. β-Ga_2O_3/p-type 4H-SiC heterojunction diodes and applications to deep-UV photodiodes[J]. Phys Status Solidi A, 2019, 216(5): 1700796.

[25] YU J G, DONG L P, PENG B, et al. Self-powered photodetectors based on β-Ga_2O_3/4H–SiC heterojunction with ultrahigh current on/off ratio and fast response[J]. J Alloys Compd, 2020, 821: 153532.

[26] WANG Y C, WU C, GUO D Y, et al. All-oxide NiO/Ga_2O_3 p–n junction for self-powered UV photodetector[J]. ACS Appl Electron Mater, 2020, 2(7): 2032–2038.

[27] ZHAO B, WANG F, CHEN H Y, et al. An ultrahigh responsivity (9.7 $mA\cdot W^{-1}$) self-powered solar-blind photodetector based on individual ZnO–Ga_2O_3 heterostructures[J]. Adv Funct Mater, 2017, 27(17): 1700264.

[28] FAN X F, ZHU Z X, ONG Y S, et al. A direct first principles study on the structure and electronic properties of $Be_xZn_{1-x}O$[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(12): 121121.

[29] DING S F, FAN G H, LI S T, et al. Theoretical study of $Be_xZn_{1-x}O$ alloys[J]. Phys B Condens Matter, 2007, 394(1): 127–131.

[30] LI M K, LUO M H, ZHU J K, et al. First-principles calculations of the phase equilibrium of $Be_xZn_{1-x}O$ alloys[J]. J Appl Phys, 2017, 121(20): 205101.

[31] RYU Y R, LEE T S, LUBGUBAN J A, et al. Wide-band gap oxide alloy: BeZnO[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(5): 052103.

[32] KIM W J, LEEM J H, HAN M S, et al. Crystalline properties of wide band gap BeZnO films[J]. J Appl Phys, 2006, 99(9): 096104.

[33] YOO Y Z, JIN Z-W, CHIKYOW T, et al. S doping in ZnO film by supplying ZnS species with pulsed-laser-deposition method[J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(20): 3798–3800.

[34] MEYER B K, POLITY A, FARANGIS B, et al. Structural properties and bandgap bowing of $ZnO_{1-x}S_x$ thin films deposited by reactive sputtering[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(21): 4929–4931.

[35] PERSSON C, PLATZER-BJÖRKMAN C, MALMSTRÖM J, et al. Strong valence-band offset bowing of $ZnO_{1-x}S_x$ enhances p-type nitrogen doping of ZnO-like alloys[J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(14): 146403.

[36] YANG C, LI X M, GU Y F, et al. ZnO based oxide system with continuous bandgap modulation from 3.7 to 4.9 eV[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(11): 112114.

[37] 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 Hui, SHEN Longhai, LIU Zitong, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(1): 145–151.

[38] COPPA B J, DAVIS R F, NEMANICH R J. Gold Schottky contacts on oxygen plasma-treated, *n*-type ZnO(000$\bar{1}$)[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(3): 400–402.

[39] HE Y B, WANG L H, ZHANG L, et al. Solubility limits and phase structures in epitaxial ZnOS alloy films grown by pulsed laser deposition[J]. J Alloys Compd, 2012, 534: 81–85.

[40] LAAJALEHTO K, KARTIO I, NOWAK P. XPS study of clean metal sulfide surfaces[J]. Appl Surf Sci, 1994, 81(1): 11–15.

[41] PARK D S, VASHEGHANI FARAHANI S K, WALKER M, et al. Recrystallization of highly-mismatched $Be_xZn_{1-x}O$ alloys: Formation

of a degenerate interface[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2014, 6(21): 18758–18768.

[42] SU L X, CHEN H Y, XU X J, et al. Novel BeZnO based self-powered dual-color UV photodetector realized *via* a one-step fabrication method[J]. Laser Photonics Rev, 2017, 11(6): 1700222.

[43] GAO J, GUO W, FENG D, et al. High-performance ionic diode membrane for salinity gradient power generation[J]. J Am Chem Soc, 2014, 136(35): 12265–12272.

[44] ZHANG T, LI M K, CHEN J, et al. Multi-component ZnO alloys: Bandgap engineering, hetero-structures, and optoelectronic devices[J]. Mater Sci Eng R Rep, 2022, 147: 100661.

[45] CHEN X, WANG L Y, LIU K W, et al. Responsivity improvement of a packaged ZnMgO solar blind ultraviolet photodetector *via* a sealing treatment of silica gel[J]. J Mater Chem C, 2020, 8(3): 1089–1094.

[46] PALAFERRI D, TODOROV Y, BIGIOLI A, et al. Room-temperature nine-μm-wavelength photodetectors and GHz-frequency heterodyne receivers[J]. Nature, 2018, 556(7699): 85–88.

[47] QIAN L X, WU Z H, ZHANG Y Y, et al. Ultrahigh-responsivity, rapid-recovery, solar-blind photodetector based on highly nonstoichiometric amorphous gallium oxide[J]. ACS Photonics, 2017, 4(9): 2203–2211.

[48] FIGUEROA C, VILLAFUERTE M, STRAUBE B, et al. The role of defects in the persistent photoconductivity of $BaSnO_3$ thin films[J]. J Phys Condens Matter, 2023, 35(16): 165301.

[49] GAO S L, QIU L P, ZHANG J, et al. Persistent photoconductivity of metal oxide semiconductors[J]. ACS Appl Electron Mater, 2024, 6(3): 1542–1561.

[50] WU C, HE C, GUO D, et al. Vertical α/β-Ga_2O_3 phase junction nanorods array with graphene-silver nanowire hybrid conductive electrode for high-performance self-powered solar-blind photodetectors[J]. Mater Today Phys, 2020, 12: 100193.

[51] CHEN Y C, LU Y J, LIN C N, et al. Self-powered diamond/β-Ga_2O_3 photodetectors for solar-blind imaging[J]. J Mater Chem C, 2018, 6(21): 5727–5732.

[52] WU Z P, JIAO L, WANG X L, et al. A self-powered deep-ultraviolet photodetector based on an epitaxial Ga_2O_3/Ga: ZnO heterojunction[J]. J Mater Chem C, 2017, 5(34): 8688–8693.

[53] ZHUO R R, WU D, WANG Y G, et al. A self-powered solar-blind photodetector based on a MoS_2/β-Ga_2O_3 heterojunction[J]. J Mater Chem C, 2018, 6(41): 10982–10986.

[54] CHEN J, PRIYA A S, YOU D, et al. Self-driven ultraviolet photodetectors based on ferroelectric depolarization field and interfacial potential[J]. Sens Actuat A Phys, 2020, 315: 112267.

[55] SUN H J, NEUMANN C, ZHANG T, et al. Poly(1, 4-diethynylbenzene) gradient homojunction with enhanced charge carrier separation for photoelectrochemical water reduction[J]. Adv Mater, 2019, 31(19): 1900961.

[56] SAIDAMINOV M I, ADINOLFI V, COMIN R, et al. Planar-integrated single-crystalline perovskite photodetectors[J]. Nat Commun, 2015, 6: 8724.

BeZnOS/Ga_2O_3 Heterostructure Thin Films: Fabrication and Self-Driven Ultraviolet Photodetectors

ZHANG Teng, *ZHU Yongdan*, *ZHANG Yuan*, *REN Dahua*, *ZHOU Zhangyang*, *YU Jiying*, *YI Jinqiao*
(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei, China)

Extended Abstract

Objective Wide-bandgap oxide semiconductors Ga_2O_3 and ZnO have garnered significant attention due to their exceptional optoelectronic properties and thermo-chemical stability. This study innovatively integrates a ZnO quaternary alloy (BeZnOS) with Ga_2O_3 to construct a novel BeZnOS/Ga_2O_3 heterojunction ultraviolet photodetector. By leveraging the synergistic band modulation *via* isovalent ion (Be^{2+}/S^{2-}) co-doping in ZnO, we aim to enhance the photogenerated carrier separation and transport efficiency through optimized heterojunction band alignment, ultimately developing a high-performance self-driven deep-UV photodetector. This work provides new insights into ZnO bandgap engineering and establishes a materials foundation for developing high-performance, all-oxide-based deep-ultraviolet photodetectors.

Methods The heterostructure thin films were synthesized *via* pulsed laser deposition (PLD) using KrF excimer laser ablation (λ = 248 nm) on *c*-plane sapphire substrates. Ceramic targets of BeZnOS and Ga_2O_3 were prepared by solid-state sintering at 1200 ℃ under argon atmosphere. Prior to deposition, substrates underwent rigorous cleaning in acetone, ethanol, and deionized water (15 min each) followed by N_2 drying. BeZnOS films were grown at 700 ℃ with 2 Pa O_2 partial pressure and 350 mJ laser energy, while Ga_2O_3 layers were selectively deposited through a shadow mask at 650 ℃ (2 Pa O_2, 250 mJ). Post-growth in situ annealing was performed at 550 ℃ (20 Pa O_2, 20 min) to optimize crystallinity. Device fabrication was completed by depositing Pt (high-work-function) and Al (low-work-function) electrodes through magnetron sputtering (100 W, 1.5 Pa Ar) to form Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al architectures with 200 μm×200 μm contacts.

Comprehensive structural and optoelectronic characterizations were conducted using high-resolution X-ray diffraction (XRD), UV-Vis-NIR transmission spectroscopy, field-emission scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (FESEM/EDS), and X-ray/ultraviolet photoelectron spectroscopy (XPS/UPS). These techniques systematically analyzed crystalline phase purity, optical bandgaps, elemental distribution profiles, and energy band configurations. A Omni-λ 3027 setup consisting of Keithley 2635 digital source meter, probe station, electromagnetic shielding dark box, monochromator, 150 W xenon lamp and

phase-locked amplifier, was utilized to measure the optoelectronic performances of the photodetector.

Results and discussion Structural characterization *via* high-resolution XRD confirmed phase-pure hexagonal wurtzite BeZnOS and monoclinic β-Ga_2O_3 film. Optical transmission spectrum revealed dual absorption edges, corresponding to direct bandgaps of 3.30 (BeZnOS) and 4.50 eV (Ga_2O_3) *via* Tauc analysis. Cross-sectional FE-SEM demonstrated layer thicknesses of 212 nm (BeZnOS) and 165 nm (Ga_2O_3), while EDS mapping confirmed elemental stratification with well-defined heterointerfaces. The fabricated Pt/BeZnOS/Ga_2O_3/Al photodetector exhibits pronounced rectifying behavior (rectification ratio: 1.72×10^2) and achieved self-powered operation at zero bias. Notably, dual spectral response peaks emerged in the UVC and UVA regions, with a peak responsivity of 23.5 mA/W at 240 nm and a corresponding specific detectivity of 2.3×10^{11} Jones. The device further demonstrated rapid response kinetics (rise time $\tau_r = 0.09$ s; decay time $\tau_d = 0.10$ s). These exceptional characteristics originate from the synergistic coupling of built-in electric fields: 1) the type-II band alignment at the BeZnOS/Ga_2O_3 heterojunction ($\Delta E_C = 1.9$ eV, $\Delta E_V = 0.7$ eV), and 2) the Schottky barrier at the Pt/BeZnOS interface. This dual-field configuration drives efficient spatial separation of electrons and holes, reducing recombination and enhancing photocurrent generation. Additionally, the photoresponse characteristics of the device exhibit significant intensity dependence: under weak illumination, it demonstrates higher responsivity but slower response speed, whereas under strong illumination, it shows lower responsivity yet faster response speed. This phenomenon primarily originates from the carrier saturation effect in deep-level trap states, whereby high light intensity saturates the trap centers, thereby suppressing the persistent photoconductivity (PPC) relaxation process.

Conclusion This work successfully demonstrates a high-performance self-driven deep-UV photodetector based on an engineered BeZnOS/Ga_2O_3 heterojunction, achieving high sensitivity ($R_{240\ nm} = 23.5$ mA/W, $D^* = 2.3\times10^{11}$ Jones) and fast response (τ_r/τ_d = 0.09 s/0.10 s) at zero bias. The fabricated heterojunction forms a type-II band alignment, which directionally couples with the built-in electric field of the Pt/BeZnOS Schottky junction to generate an enhanced composite field. This synergistic configuration significantly promotes the separation and transport of photogenerated carriers, ultimately enabling high-sensitivity and rapid-response self-powered operation. The innovative dual-junction synergistic modulation strategy demonstrates significant potential for advancing self-driven optoelectronic devices.

Keywords wide-bandgap semiconductors; oxide thin films; heterojunction; self-driven ultraviolet photoresponse