

文章编号: 1000-7032(2025)09-1548-16

氧化镓 X 射线探测器

张志鹏, 陈 军*

(中山大学 电子与信息工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 氧化镓具有低能 X 射线吸收效率高、高工作电场、低暗电流和高物理化学稳定性等优点, 是直接转换 X 射线探测器的重要候选材料之一。本文分别从材料、器件结构、光电转换机制和器件应用等方面, 详细综述了氧化镓 X 射线探测特性及其器件研究进展。目前研究已制备了非晶氧化镓薄膜、多晶(含微米晶和纳米晶)氧化镓薄膜、高取向性外延单晶氧化镓薄膜、单晶氧化镓块体和单晶氧化镓微米线等材料的 X 射线探测器并研究它们的探测性能, 采用的器件结构包括金属-半导体-金属(MSM)、肖特基结、异质结和真空结构等, 并提出了光电导增益、雪崩增益和电子轰击诱导光电导效应等多种光电转换机制。在器件应用方面, 展示了氧化镓 X 射线探测器在 X 射线剂量计、X 射线成像和可穿戴 X 射线传感器上的应用。基于上述研究进展, 进一步展望了氧化镓 X 射线探测器研究的未来发展方向。

关键词: 氧化镓; X 射线探测器; 结晶性; 薄膜; 光电转换机制

中图分类号: TL816.1 **文献标识码:** A

DOI: 10.37188/CJL.20250136 **CSTR:** 32170.14.CJL.20250136

Gallium Oxide X-ray Detectors

ZHANG Zhipeng, CHEN Jun*

(School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

* Corresponding Author, E-mail: stscjun@mail.sysu.edu.cn

Abstract: Gallium oxide (Ga_2O_3) has the advantages of high absorption efficiency for low-energy X-rays, high operating electric field, low dark current and high physicochemical stability, and is one of the important candidate materials for direct-conversion X-ray detectors. This paper reviews the progress of X-ray detection characteristics of Ga_2O_3 and its device research from the perspectives of material, device structure, photoelectric conversion mechanism, and device applications. At present, the X-ray detectors using amorphous Ga_2O_3 thin films, polycrystalline (including microcrystalline and nanocrystalline) Ga_2O_3 thin films, highly oriented epitaxial single-crystal Ga_2O_3 thin films, single-crystal Ga_2O_3 bulks, and single-crystal Ga_2O_3 microwires have been fabricated and their detection performances have been studied. The device structures employed include metal-semiconductor-metal (MSM), Schottky junctions, heterojunctions, and vacuum structures. Various photoelectric conversion mechanisms, such as photoconductive gain, avalanche gain, and electron bombardment induced photoconductivity effect, have been proposed. In terms of device applications, the applications of Ga_2O_3 X-ray detectors in X-ray dosimeters, X-ray imaging, and wearable X-ray sensors have been displayed. Based on the above research progress, this paper further looks forward to the future development direction of Ga_2O_3 based X-ray detectors.

Key words: gallium oxide; X-ray detectors; crystallinity; thin film; photoelectric conversion mechanism

收稿日期: 2025-04-30; 修订日期: 2025-05-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2023B0101200013)

Supported by Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province(2023B0101200013)

1 引言

X射线探测器是X射线探测和成像的核心器件,在医疗成像、工业检测、安全检查和科学研究等领域具有重要应用^[1-7]。X射线探测器分为间接转换X射线探测器和直接转换X射线探测器。间接转换X射线探测器先由闪烁体将X射线转换成可见光,再由光电二极管将可见光转换成电信号。由于闪烁体层的存在,间接转换探测器存在量子探测效率和空间分辨率互相制约的问题^[8-10]。直接转换X射线探测器由光电导材料^[11]直接将X射线转换成电信号,器件的结构简单,串扰小,并可实现高量子探测效率和高空间分辨率^[11-14]。当前的直接转换光电导材料主要有Si^[15-16]、a-Se^[17-19]、CdTe^[20-22]、HgI₂^[23-25]、PbI₂^[26-28]、PbO^[29-31]、钙钛矿^[32-34]、GaN^[35-36]和Ga₂O₃^[37-39]等。光电导材料的X射线响应特性与其工作电场、X射线吸收效率、载流子迁移率寿命乘积、热稳定性、组分和结晶度等参数有关。器件的工作电场、材料的X射线吸收效率和载流子迁移率寿命乘积等参数会影响探测器的灵敏度;光电导材料的热稳定性和物理化学稳定性会影响探测器的寿命;光电导材料的结晶性会影响探测器的响应速度。因此,如何制备出稳定工作、高灵敏度和快速响应的X射线探测器是该领域的瓶颈问题之一。

氧化镓是一种宽禁带半导体,不仅广泛应用于日盲紫外探测、功率器件和气体传感等领域^[40-45],还具有优异的X射线响应特性^[46-51]。一方面,氧化镓对低能X射线(1~30 keV)的吸收效率高,可对低能X射线实现超高灵敏度X射线探测(大于 $1 \times 10^4 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)^[46-48]。另一方面,氧化镓的禁带宽度约为4.9 eV,工作电场最大可达 $8 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[40]。由于探测器的电荷收集效率与工作电场息息相关,氧化镓X射线探测器可在高电场下利用高电荷收集效率实现高灵敏度X射线探测。另外,氧化镓半导体具有高电阻率和高物理化学稳定性,可实现低暗电流(小于 $10 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$)、低光电流波动性(5 min内小于1%)和极低的X射线探测极限($8.3 \text{ nGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$)^[49-51]。其中,纳米晶氧化镓兼顾大面积均匀性和高性能直接探测的特点,基于纳米晶氧化镓的X射线探测成为研究热点。尽管如此,氧化镓X射线探测器的性能受到材料制备、器件结构和物理机制的影响,还难以实现实际应用。

近年来,研究者在氧化镓X射线探测器的材料、结构、机制和器件应用等方面开展了系统的研究。材料制备上,研究者主要开展了非晶氧化镓薄膜、多晶(含微米晶和纳米晶)氧化镓薄膜、高取向性外延单晶氧化镓薄膜、单晶氧化镓微米线和单晶氧化镓块体的X射线探测器研究。其中,非晶和多晶氧化镓薄膜主要使用磁控溅射和电子束蒸发技术制备^[52-54];高取向性外延单晶氧化镓薄膜主要使用分子束外延^[55-56]、金属有机化学气相沉积(MOCVD)^[57-58]、卤化物气相外延^[59-60]和脉冲激光沉积^[61-62]等技术制备;单晶氧化镓微米线主要使用化学气相沉积(CVD)方法制备^[63-64];单晶氧化镓块体主要使用直拉法^[65-66]、导模法(EFG)^[67-68]、垂直布里奇曼法^[69-70]和浮区法(FZ)^[71-72]等方法制备。器件结构上,研究者开展了金属-半导体-金属(MSM)^[73-74]、肖特基^[75-76]、异质结^[77-78]和真空结构^[79-80]的X射线探测器研究。MSM结构具有制作简单和成本低等优点,但也存在器件暗电流、灵敏度和响应速度等特性难以调控的问题。其中,钛/金电极与氧化镓通过退火易于形成欧姆接触^[81]。肖特基结构和异质结构的氧化镓X射线探测器可利用空间电荷效应实现低暗电流和低探测极限的X射线探测。真空结构的氧化镓X射线探测器则提高了器件的工作电场,可实现类似真空光电倍增管的低剂量和高灵敏度X射线探测。光电转换机制上,研究者提出了光电导增益^[77,82]、雪崩增益^[83-85]和电子轰击诱导光电导效应^[79-80,86-87]的光电倍增机制,从而提高氧化镓X射线探测器的灵敏度和降低探测极限。器件应用上,研究者开展了X射线剂量计、大面积成像和可穿戴X射线传感器等应用研究,为氧化镓X射线探测器的实际应用提供了技术方案^[46,49,88]。

本文将从氧化镓的X射线响应特性以及探测器的制备方法、器件结构、光电转换机制和器件应用等方面展开系统的介绍,并展望氧化镓X射线探测器的未来发展方向。

2 氧化镓基本特性

氧化镓有 α 型、 β 型、 γ 型、 δ 型和 ε 型五种同分异构体,其中 β 型是最稳定的,其他4种结构均为亚稳态。在一定气压或温度条件下,所有其他的异构体都可以转换为稳定的 β -Ga₂O₃(图1(a))^[89]。 β -Ga₂O₃是单斜晶系,空间群为C2/m,晶格常数分别为 $a=1.221 \text{ nm}$, $b=0.304 \text{ nm}$, $c=0.580 \text{ nm}$, $\beta=$

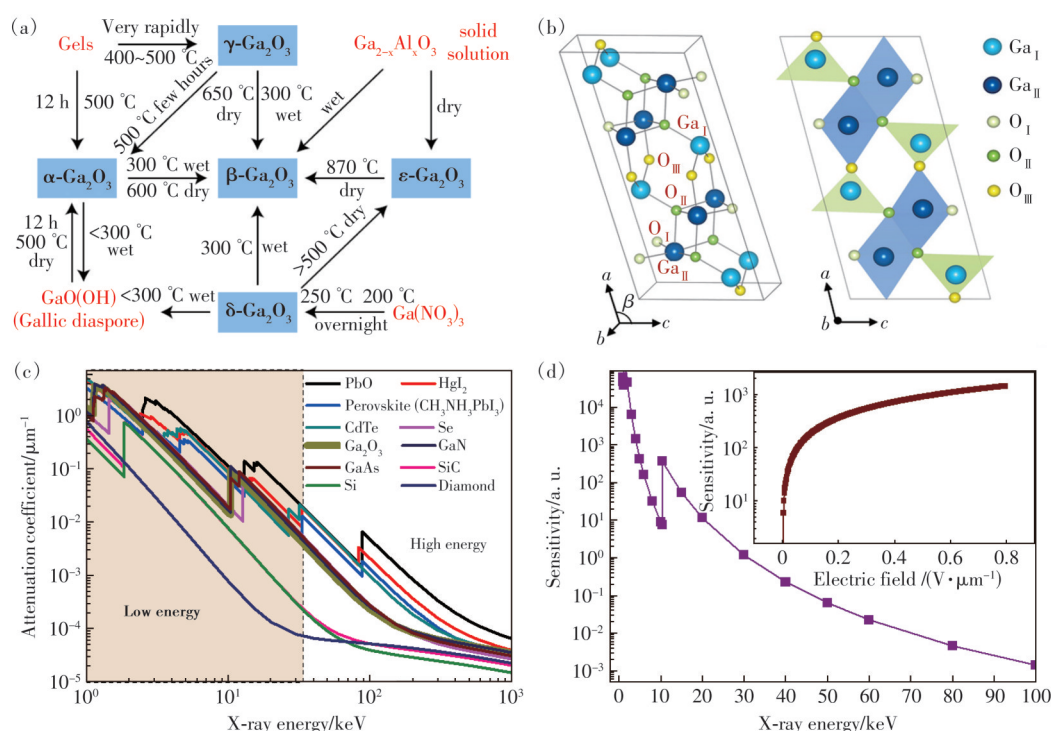


图1 氧化镓光电导材料的基本特性。(a)不同晶相氧化镓的转化关系;(b) β -Ga₂O₃的晶体结构;(c)不同光电导材料的吸收系数;(d)氧化镓的探测灵敏度与X射线能量的关系(插图为对应的灵敏度与电场的关系)^[41,83,89]

Fig.1 Basic properties of gallium oxide photoconductive materials. (a)Transformation relationships among different crystal phases of gallium oxide. (b)Crystal structure of β -Ga₂O₃, (c)Absorption coefficients of various photoconductive materials. (d)Relationship between the detection sensitivity of gallium oxide and X-ray energy (the inset shows the corresponding sensitivity as a function of electric field)^[41,83,89]

103.83°,并且Ga有八面体和四面体两种不同的格位,而O有三种不同的格位(图1(b))^[41]。氧化镓具有宽禁带的直接带隙(4.9 eV),本征载流子浓度较低。研究者往往采用Si、Ge和Sn等杂质的掺杂提高氧化镓的载流子浓度^[63,67,90-91],而采用Fe和Mg等离子掺杂降低氧化镓的载流子浓度和提高氧化镓的电阻率^[92-93],从而调控氧化镓探测的光暗电流。氧化镓的熔点为1725℃,具有耐辐射和耐高温特性,可应用于恶劣环境中的光电探测^[39]。

当氧化镓受到X射线辐照时,价带或者缺陷能级中的电子跃迁到导带中,形成光生载流子。在X射线探测中,光生载流子的数量主要与探测材料的X射线吸收效率有关。光生载流子在电场的作用下被电极收集,形成光电流。光电流的大小与电荷收集效率有关。氧化镓的密度为5.88 g·cm⁻³,对低能X射线(1~30 keV)的吸收效率高。在20 keV的X射线照射下,氧化镓的线性衰减系数(17 mm⁻¹)优于或者接近Si(1.0 mm⁻¹)、CdTe(12.5 mm⁻¹)和CH₃NH₃PbI₃(19.3 mm⁻¹)的线

性衰减系数(图1(c))^[83]。一定厚度下,线性衰减系数越高,光电导材料的X射线吸收效率也越高。因此,氧化镓在低能X射线探测中可实现极高灵敏度(大于 $1 \times 10^4 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)^[83,88]。另外,在光电探测器中,往往采用Schubweg值(载流子迁移率、寿命和工作电场的乘积)的高低来评价探测器的电荷收集效率^[34,94]。氧化镓的载流子迁移率寿命乘积^[34]约为 $10^{-4} \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1}$,工作电场最大可达8 MV·m⁻¹。氧化镓的Schubweg值比大多数光电导材料的要高,从而实现较高的电荷收集效率和X射线探测灵敏度(表1)^[17-39]。研究表明,氧化镓X射线探测器的灵敏度随着X射线能量的升高而降低,并且随着工作电场的提高而升高(图1(d))^[83]。

表2汇总了近年来报道的氧化镓X射线探测器的性能^[46-51,73-80,83,88,95-102]。氧化镓X射线探测器的暗电流最低为1 pA·mm⁻²,最高灵敏度为 $5.9 \times 10^5 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,最低探测极限为8.3 nGy_{air}·s⁻¹,最快响应时间为0.16 ms,上述结果验证了氧化镓可实现高性能X射线探测。然而,一方面,单晶氧化镓X射线探测器虽然可实现低暗电流、高灵敏

表 1 不同光电导材料的典型 Schubweg 值^[17-39]

Tab. 1 Typical Schubweg values of various photoconductive materials

光电导材料	载流子迁移率寿命乘积/(cm ² ·V ⁻¹)	工作电场/(V·μm ⁻¹)	Schubweg 值/mm
Ga ₂ O ₃	~10 ⁻⁴	1~100	10~10 ³
a-Se	3×10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁵	10	0.3~10
CdTe	2×10 ⁻⁴	0.25	5
HgI ₂	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴	0.5	0.5~5
PbI ₂	7×10 ⁻⁸	0.5	3.5×10 ⁻³
PbO	5×10 ⁻⁷	1.0	5×10 ⁻²
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	~10 ⁻⁴	0.25	2.5

表 2 氧化镓 X 射线探测器特性比较

Tab. 2 Comparison of properties of gallium oxide X-ray detectors

材料类型	器件结构	制备方法	结晶性	X 射线能量/ kV	暗电流/ (pA·mm ²)	灵敏度/ (μC·Gy _{air} ⁻¹ ·cm ⁻²)	探测极限/ (μGy _{air} ·s ⁻¹)	响应时间/ ms	文献
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	磁控溅射	非晶	20~70	~57	1.6×10 ⁵	~100	>1 000	[46]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	磁控溅射	非晶	40	2.2×10 ²	6.77	<1.4×10 ⁵	1 800	[73]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	磁控溅射	非晶	40	3	1.6×10 ⁵ mV·Gy ⁻¹	—	—	[49]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	电子束蒸发	纳米晶	80	20	2.78	5.8×10 ³	<35	[74]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	MOCVD	高取向性外延单晶	60	—	3.7×10 ⁵	1.5×10 ⁴	>1 000	[47]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	MOCVD	高取向性外延单晶	60	5×10 ³	1.2×10 ⁵	<1.5×10 ⁴	200	[48]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	MOCVD	高取向性外延单晶	0.3	~5×10 ⁶	3×10 ³ A·W ⁻¹	—	40	[95]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	MSM	MOCVD	高取向性外延单晶	30	2.4×10 ²	1.9×10 ⁴	42	37	[83]
Ga ₂ O ₃ 微米线	MSM	CVD	单晶	4~32	2 nA	1.6×10 ³ A·W ⁻¹	—	2.2×10 ⁴	[96]
Ga ₂ O ₃ 微米线	MSM	CVD	单晶	60	70 pA	5.9×10 ⁵	6.7×10 ⁻²	0.16	[88]
Ga ₂ O ₃ (Fe) 块体	MSM	EFG	单晶	30	9.6	23.2 nC·Gy _{air} ⁻¹	—	<20	[97]
Ga ₂ O ₃ (Fe) 块体	MSM	EFG	单晶	45	~1.0	Unknow	Unkown	<300	[50]
Ga ₂ O ₃ (Mg) 块体	MSM	FZ	单晶	16	31	338.9	<69.5	<200	[98]
Ga ₂ O ₃ (Al) 块体	MSM	FZ	单晶	50	11	851.6	9.8	<20	[99]
Ga ₂ O ₃ (Fe) 块体	MSM	FZ	单晶	50	18	75.3	<831	200	[100]
Ga ₂ O ₃ 块体	肖特基结	EFG	单晶	30	4×10 ⁶	~1.4×10 ³	~3.8×10 ⁵	1 400	[75]
Ga ₂ O ₃ 块体	肖特基结	EFG	单晶	50	100	4.3×10 ⁴	8.3×10 ⁻³	250	[51]
Ga ₂ O ₃ 块体	肖特基结	EFG	单晶	30	~1×10 ⁶	~2.4×10 ²	<1.5×10 ⁶	1.8×10 ⁴	[76]
Ga ₂ O ₃ /NiO	异质结	电子束蒸发	纳米晶	6~50	5.2×10 ³	3.4×10 ⁴	42	2.2	[77]
Ga ₂ O ₃ /NiO 异质结	异质结	EFG	单晶	30	204	0.2	8×10 ⁵	<20	[78]
Ga ₂ O ₃ /NiO 异质结	异质结	EFG	单晶	30	~1×10 ⁵	~750	1.9×10 ⁵	2.9×10 ³	[101]
Ga ₂ O ₃ /FAPb ₃ 异质结	异质结	电子束蒸发	纳米晶	80	5	1.3×10 ³	230	20	[102]
Ga ₂ O ₃ (Fe) 块体	真空二极管	EFG	单晶	6~50	1.6×10 ⁵	1.3×10 ³	280	40	[79]
Ga ₂ O ₃ 薄膜	真空二极管	电子束蒸发	纳米晶	6~50	50	7.1×10 ²	—	5.3	[80]

度、低探测极限和快速响应,但是其器件面积有限,制作大面积探测器时需要拼接、高分辨成像阵列集成难度高;另一方面,非晶氧化镓 X 射线探测器可利用真空沉积工艺实现大面积成像器件,但是其缺陷密度高带来暗电流高、探测极限高和响应速度慢等缺点。近年来,研究者提出了纳米晶氧化镓 X 射线探测器,兼具单晶氧化镓的高探测性能(最高灵敏度可达 $3.4\times10^4\text{ }\mu\text{C}\cdot\text{Gy}_{\text{air}}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$)和非晶氧化镓的大面积特性(面积在 $6\text{ cm}\times6\text{ cm}$ 以上),有望实现直接转换平板 X 射线探测器的实际应用^[74,77,80,102]。

下文将从材料制备、器件结构和光电转换机制的角度介绍氧化镓 X 射线探测器研究进展。

3 氧化镓 X 射线探测器的材料类型

近年来,文献报道了基于非晶氧化镓薄膜、多晶(含微米晶和纳米晶)氧化镓薄膜、高取向性外延单晶氧化镓薄膜、单晶氧化镓块体和单晶氧化镓微米线的 X 射线探测器(图 2)^[74,83,88,98]。

3.1 非晶或多晶氧化镓薄膜 X 射线探测器

非晶或者多晶氧化镓薄膜一般采用磁控溅射和电子束蒸发技术制备^[46,49,73-74,77,80,102],具有工艺简单、低成本、可柔性化和缺陷可调等优点。比如,Liang 等采用磁控溅射方法在柔性衬底上制备出大面积非晶氧化镓薄膜,并通过制备 ITO 叉指电极,实现氧化镓 X 射线探测器^[73]。通过调控镀膜过程中的氧气含量,可制备出不同氧空位浓度的

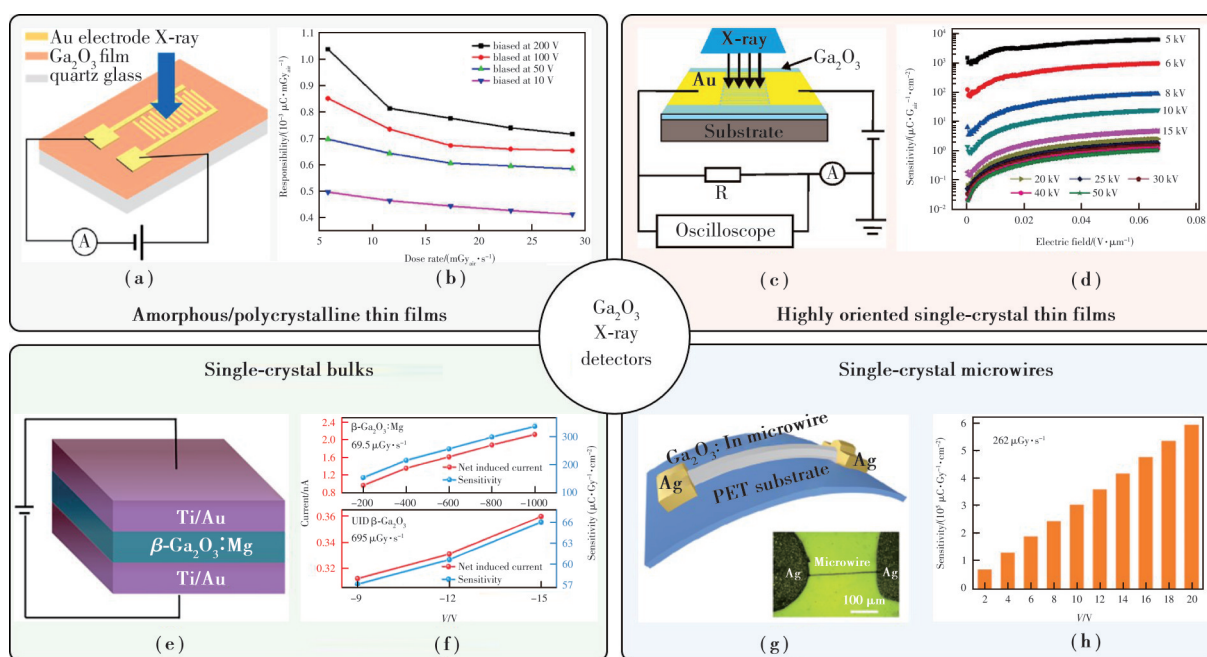


图2 氧化镓X射线探测器的材料类型。(a)~(b)非晶或者多晶氧化镓薄膜X射线探测器;(c)~(d)高取向性单晶氧化镓薄膜X射线探测器;(e)~(f)单晶氧化镓块体X射线探测器;(g)~(h)单晶氧化镓微米线X射线探测器^[74,83,88,98]

Fig.2 Categories of materials for gallium oxide X-ray detectors. (a)–(b) Amorphous or polycrystalline gallium oxide thin-film X-ray detectors. (c)–(d) Highly oriented single-crystal gallium oxide thin-film X-ray detectors. (e)–(f) Single-crystal gallium oxide bulk X-ray detectors. (g)–(h) Single-crystal gallium oxide microwire X-ray detectors^[74,83,88,98]

非晶氧化镓薄膜。结果显示,氧空位浓度越低,暗电流越小,响应速度越快,但灵敏度越低。同时,氧空位浓度太高,导致非晶氧化镓X射线探测器的暗电流偏大($2.2 \times 10^2 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$)和探测极限偏大($1.4 \times 10^5 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),并且存在持续光电导效应^[103-104],响应时间为1.8 s。Chen等采用电子束蒸发技术制备出纳米晶氧化镓薄膜及其X射线探测器,有望解决非晶氧化镓薄膜在暗电流、灵敏度和响应速度上的瓶颈问题^[74]。在外加电场为 $0.25 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时,纳米晶 Ga_2O_3 薄膜X射线探测器的暗电流为 $20 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$,探测灵敏度为 $138.80 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{mGy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$,响应时间小于35 ms,且没有明显的持续光电导效应。进一步的研究发现,纳米晶氧化镓薄膜可通过大面积真空沉积工艺制备,兼容现代半导体工艺,集成度高,从而易于实现大面积X射线成像器件^[77,80,102]。

3.2 高取向性外延单晶氧化镓薄膜X射线探测器

高取向性外延单晶氧化镓薄膜一般采用MOCVD技术制备^[47-48,83,95]。比如,Zhang等利用MOCVD方法制备得到的2英寸 $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜(400 nm)制备出X射线探测器^[83]。探测器对低能X射线(5~30 keV)实现了高灵敏度($1.9 \times 10^4 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)、低探测极

限($42.3 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和快速(37 ms)探测。Gan等利用MOCVD技术在蓝宝石衬底上制备出高结晶性 Ga_2O_3 薄膜及其X射线探测器,在低能X射线上实现了极高灵敏度X射线探测($3.72 \times 10^5 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)^[47]。Peng等利用MOCVD技术在蓝宝石衬底上制备出2英寸高结晶度 Ga_2O_3 薄膜,并制作出一种无需集成开关元件,通过光子来控制导通和截止的光子控制二极管,实现了高分辨率和防串扰X射线成像^[48]。X射线探测器的灵敏度为 $1.2 \times 10^5 \text{ } \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,响应时间小于200 ms。因此,高取向性外延单晶氧化镓薄膜X射线探测器可实现高灵敏度和快速响应的X射线探测。然而,高取向性外延单晶氧化镓薄膜存在制备成本高、大面积制备困难、与有源器件集成难等问题需要解决。

3.3 单晶氧化镓块体X射线探测器

单晶氧化镓块体X射线探测器主要使用EFG和FZ技术制备^[50-51,75-76,78-79,97-101]。单晶氧化镓块体的厚度较大,提升了X射线的吸收,但对应的电荷收集效率下降。同时,Fe和Mg等离子掺杂的单晶氧化镓块体具有低的载流子浓度和较高的电阻率,从而实现了低暗电流和低探测极限。比如,Zhou等利用EFG技术制备的Fe掺杂单晶氧化镓块体制备出

X 射线探测器, 暗电流为 $9.6 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$, 灵敏度为 $23.2 \text{ nC} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1}$, 并且实现了 50 ns 的 X 射线脉冲检测, 时间分辨率为 2 ns ^[97]。Hany 利用 EFG 技术制备的 Fe 掺杂单晶氧化镓块体制备出低噪音的 X 射线探测器, 暗电流低至 $1 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$, 信噪比大于 $10^{3[50]}$ 。Chen 等则利用 FZ 技术制备的 Mg 掺杂单晶氧化镓块体制备出 X 射线探测器, 电阻率可达 $6.4 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$, 暗电流为 $31 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$, 灵敏度为 $338.9 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 探测极限小于 $69.5 \mu\text{Gy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$, 响应时间小于 0.2 s ^[98]。Li 等则利用 FZ 技术制备的 Al 掺杂单晶氧化镓块体制备出 X 射线探测器, 并通过调控 Al 含量优化了探测器的响应特性, 暗电流为 $11 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$, 灵敏度为 $851.6 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 探测极限为 $9.8 \mu\text{Gy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$, 响应时间小于 0.2 s ^[99]。

3.4 单晶氧化镓微米线 X 射线探测器

利用单晶氧化镓微米线制备 X 射线探测器,

可实现柔性 and 小型化 X 射线传感器, 具有重要的应用价值^[88,96]。Zhang 等利用 CVD 技术制备出 Sn 掺杂的单晶氧化镓微米线及其 X 射线探测器, 实现了 $4 \sim 32 \text{ keV}$ 能量范围的 X 射线检测, 暗电流为 2 nA , 光暗电流比大于 100 ^[96]。另外, 该探测器可在常温至 623 K 温度范围内稳定工作, 说明单晶氧化镓微米线 X 射线探测器具有良好的耐高温特性。Chen 等利用 CVD 方法制备出高结晶度和高稳定的 In 掺杂单晶氧化镓微米线 X 射线探测器, 暗电流为 70 pA , 灵敏度为 $5.9 \times 10^5 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 探测极限为 $67 \text{ nGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$, 响应时间为 0.16 ms ^[88]。

4 氧化镓 X 射线探测器的器件结构

探测器性能与器件结构密切相关。已报道的氧化镓 X 射线的器件结构主要有 MSM 结构、肖特基结构、异质结构和真空结构(图 3)^[73,77,79,105]。

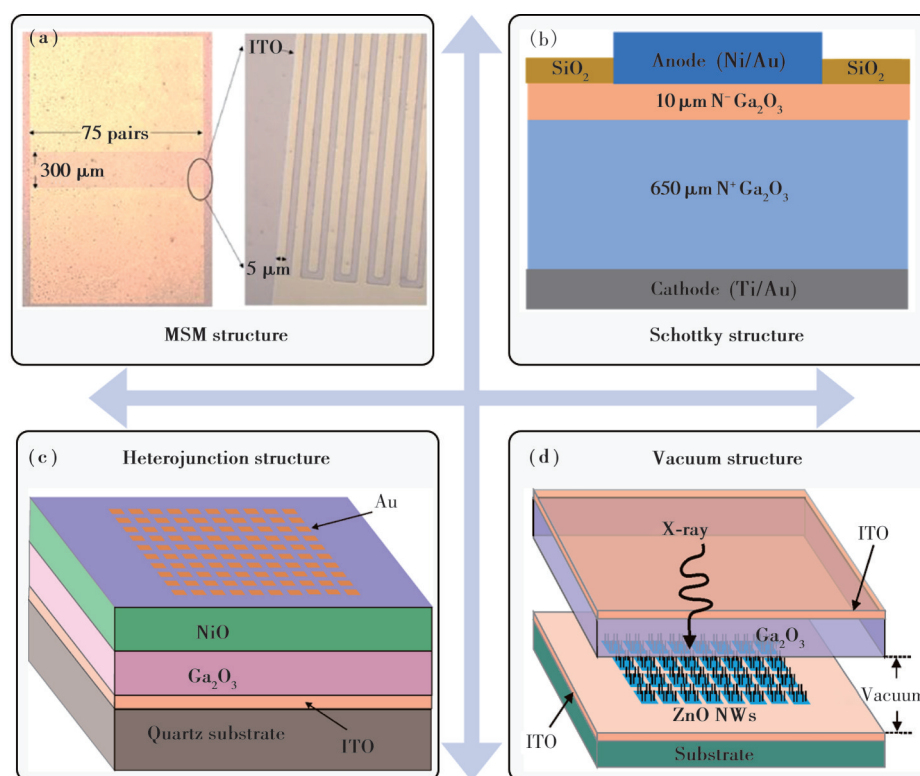


图3 氧化镓 X 射线探测器的器件结构。(a)MSM 结构;(b)肖特基结构;(c)异质结构;(d)真空结构^[73,77,79,105]

Fig.3 Device structures of gallium oxide X-ray detectors. (a) MSM structure. (b) Schottky structure. (c) Heterojunction structure. (d) Vacuum structure^[73,77,79,105]

4.1 MSM 结构

研究表明, MSM 结构探测器的 X 射线探测灵敏度和响应时间受到电极间距的影响^[83,106]。例如, Zhang 等制备出 MSM 结构的高取向性外延单晶氧化镓薄膜 X 射线探测器, 当电极间距从 $3000 \mu\text{m}$ 下降到 $16.5 \mu\text{m}$ 时, 暗电流从 0.08 nA

上升到 1.23 nA , 而光电流从 0.79 nA 上升到 15.78 nA ^[83]。随着电极间距的下降, 探测器的灵敏度快速上升。当电极间距从 $3000 \mu\text{m}$ 下降到 $16.5 \mu\text{m}$ 时, 探测器的灵敏度从 $12 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 上升到 $1.9 \times 10^4 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。另外, 减小电极间距可以缩短渡越时间, 但是电极间距减小会造成

成电极之间的电容增加,从而使得响应时间增加^[107]。因此,需要设计合适的电极间距,以优化探测器的电荷收集效率和响应时间。另外,MSM结构的电极材料主要有金^[46,73-74,83]、银^[88,96]、以及钛/金^[47-49,97]电极,其中钛/金电极与氧化镓通过退火更容易实现欧姆接触。电极位置主要有横向电极^[47-48,73-74,83,95]和纵向电极^[50,97-100],其中横向电极一般用于氧化镓薄膜,而纵向电极一般用于氧化镓块体。

4.2 肖特基结构

采用肖特基结构,可以通过空间电荷区提高光生载流子收集效率;在反向偏压下,器件具有较低的暗电流,可提高线性动态范围和降低探测极限;可利用空间电荷区的漂移电流实现快速光电响应。Lu等在EFG技术制备的单晶氧化镓块体的垂直方向上分别制备Ti/Au电极和Pt/Au电极,从而实现肖特基二极管并用于X射线探测,实现了高灵敏度X射线探测($1.4 \times 10^3 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$),并且在0 V电压下利用光伏效应实现了自驱动X射线探测^[75]。Taylor等在EFG技术制备的单晶氧化镓块体上制备出Si掺杂氧化镓外延层,然后在垂直方向上分别制备Ti/Au/Ni/Au欧姆接触电极和Ni/Au肖特基接触电极,从而实现肖特基结构的X射线探测器^[51]。探测器的暗电流为 $100 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$,灵敏度为 $4.3 \times 10^4 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,探测极限为 $8.3 \text{ nGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$,响应时间为250 ms。另外,该探测器在直流模式上连续工作2 h,光电流保持不变,说明探测器具有极高的稳定性和可靠性。

4.3 异质结构

氧化镓异质结可通过调控能带结构优化X射线探测器的性能^[42]。比如,Zhang等在大面积石英衬底上利用电子束蒸发技术制备出 $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-NiO}$ 异质结,氧化镓薄膜具有独特的纳米晶结构,异质结的价带偏移为1.7 eV,导带偏移为0.84 eV,内建电势为0.2 eV,整流比为 6.0×10^4 。基于 $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-NiO}$ 异质结制备出X射线探测器,暗电流为 $5.2 \times 10^3 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$,灵敏度为 $3.4 \times 10^4 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,探测极限为 $42 \mu\text{Gy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$,响应时间为2.2 ms。Zhang等在重掺杂N型单晶氧化镓块体上制备轻掺杂N型氧化镓薄膜,然后使用磁控溅射技术在轻掺杂N型氧化镓薄膜上制备NiO薄膜,从而制备出 $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-NiO}$ 异质结,实现了自驱动的X射线探测器,暗电流为 $204 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$,灵敏度为

$0.2 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,响应时间小于20 ms。另外,研究者发现该器件在-200 V的偏压下,探测器受到13.5 kGy剂量的 γ 射线辐射后,仍能保持良好的X射线探测特性。Chen等利用纳米晶 Ga_2O_3 薄膜的高阻特性和钙钛矿(FAPbI_3)的高载流子迁移率特性,制作出了具有高光暗比、低探测极限的 $\text{FAPbI}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结X射线探测器。在外加电场为 $0.25 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时, $\text{FAPbI}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结探测器相比钙钛矿探测器,暗电流降低了3个数量级,光暗比提高了约2个数量级,探测极限改善了20倍。因此,纳米晶氧化镓薄膜的制备技术与现有的半导体工艺兼容,易于与其他半导体集成,从而实现高性能的氧化镓异质结X射线探测器。

4.4 真空结构

真空结构平板X射线探测器件由光电导阳极和冷阴极电子源组成,是一种在研的高灵敏度平板X射线探测器的方案^[108-111]。冷阴极真空器件有以下优势:真空器件耐压较高(大于 $100 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),可实现高电荷收集效率和高灵敏度X射线探测;冷阴极真空器件可实现大面积、快速响应(真空中的弹道电子输运)和低暗电流(真空间隙)。氧化镓是一种宽禁带半导体,具有高电阻率和高耐压特性,是制备冷阴极真空探测器的理想光电导阳极材料。Zhang等采用 Ga_2O_3 光电导阳极和ZnO纳米线冷阴极电子源阵列制作出直接转换冷阴极真空平板探测器,实现高性能X射线探测,灵敏度为 $3.0 \times 10^3 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,探测极限为 $0.28 \text{ mGy}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[79]。进一步利用纳米晶氧化镓薄膜集成度高的特点,制备出纳米晶 $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 异质结冷阴极,利用 $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 异质结冷阴极和ZnS薄膜实现真空冷阴极平板X射线探测器,探测器的暗电流为 $50 \text{ pA} \cdot \text{mm}^{-2}$,灵敏度为 $7.1 \times 10^2 \mu\text{C} \cdot \text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,响应时间仅为5.3 ms^[80]。另外,通过改变ZnO纳米线点阵间距优化了 $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 异质结冷阴极的电子发射效率,冷阴极平板X射线探测器的探测灵敏度提高了36倍。

5 氧化镓X射线探测器的光电转换机制

基于不同器件结构,氧化镓X射线探测器可利用光电导增益、雪崩增益和电子轰击诱导光电效应的光电倍增机制实现高灵敏度X射线探测(图4)^[77,79,83]。

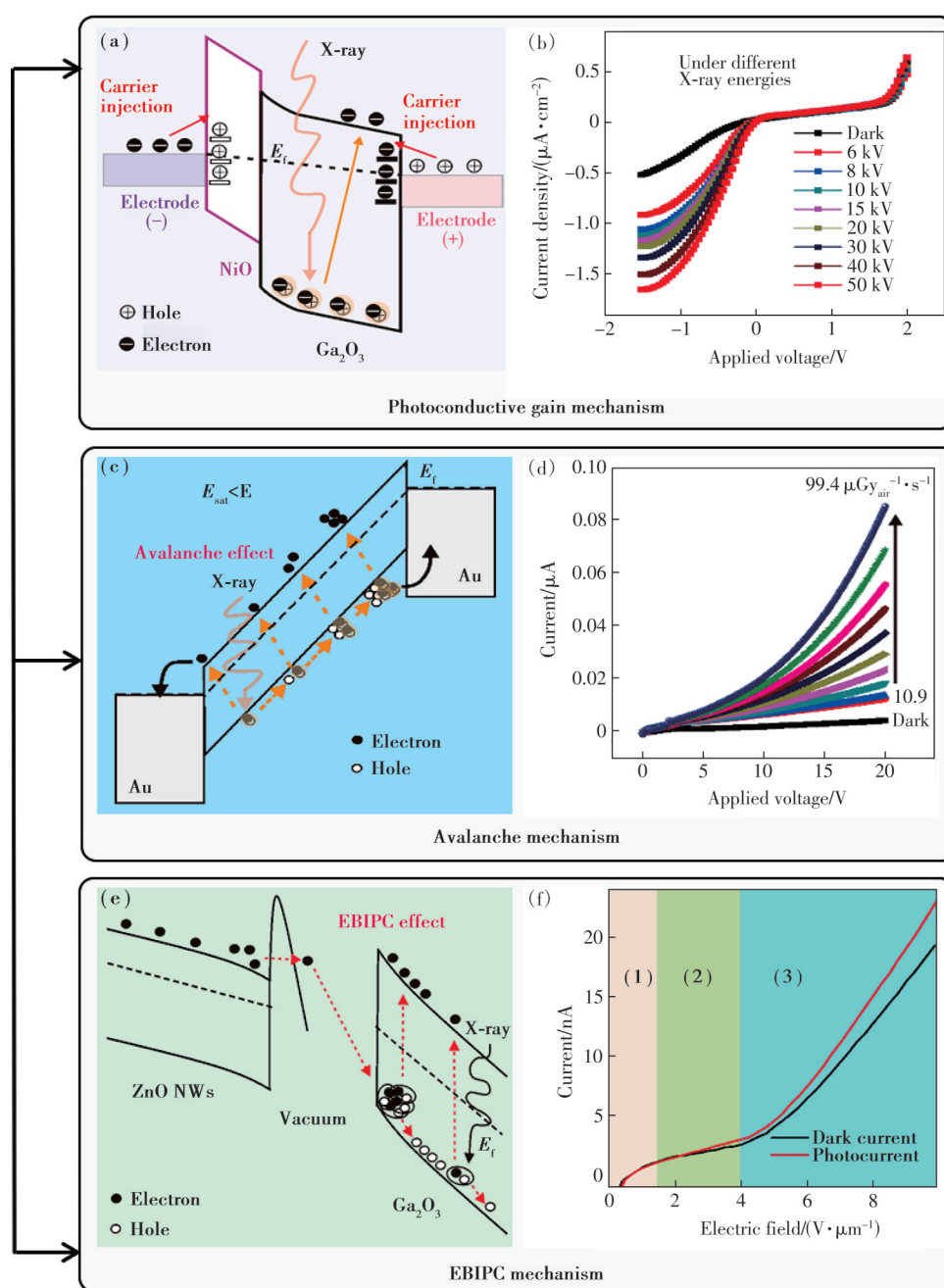


图4 氧化镓 X 射线探测器的光电转换机制。(a)~(b)光电导增益机制及其光电响应特性;(c)~(d)雪崩增益机制及其光电响应特性;(e)~(f)电子轰击诱导光电导效应的光电倍增机制及其光电响应特性^[77,79,83]

Fig.4 Photoelectric conversion mechanisms of gallium oxide X-ray detectors. (a)–(b)Photoconductive gain mechanism and its photoelectric response characteristics. (c)–(d)Avalanche gain mechanism and its photoelectric response characteristics. (e)–(f)Photoelectric multiplication mechanism of electron bombardment induced photoconductivity effect and its photoelectric response characteristics^[77,79,83]

5.1 光电导增益

光电导增益是指由于电极的载流子注入,当光生载流子寿命大于渡越时间时,产生较高的内增益^[82]。光电导增益等于光生载流子寿命与载流子渡越时间的比值。根据光电导增益的定义,延长载流子寿命和减小载流子渡越时间可以增大光

电导增益。因此,光电导增益与电极的电荷注入以及光电导材料的结晶度和迁移率等因素相关。图4(a)、(b)显示了纳米晶 Ga₂O₃-NiO 异质结 X 射线探测器的光电导增益机制及其 X 射线响应特性^[77]。光电导增益可以分为三个过程:(1)电压大于 0 V 时,由于内建电场降低,内增益较小;(2)电

压从 0 V 变化至 -0.7 V 时,由于渡越时间降低,内增益线性增大;(3)电压小于 -0.7 V 时,异质结的高阻特性使得内增益趋于饱和。探测器在 1.5 V 偏压下的暗电流为 $0.52 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。当 X 射线能量从 6 keV 上升到 50 keV 时,探测器的光电流从 $0.91 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 上升到 $1.65 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$,灵敏度从 $3.4\times 10^4 \mu\text{C}\cdot\text{Gy}_{\text{air}}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下降到 $8.7 \mu\text{C}\cdot\text{Gy}_{\text{air}}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。经计算,探测器在 20 keV 的 X 射线辐照下的内增益为 3.3×10^3 。因此,纳米晶氧化镓的缺陷低和载流子寿命长,易于实现基于光电导增益机制的高灵敏度 X 射线探测。

5.2 雪崩增益

雪崩效应是指探测材料在入射光的照射下产生电子空穴对,电子空穴对在高电场的作用下加速运动成为高能载流子,高能载流子与晶格原子发生碰撞电离并产生倍增的电子空穴对。为了提高雪崩增益,研究者一般通过增加氧化镓探测器的工作电场,从而提高碰撞电离率,并且设计基于肖特基结或者异质结的器件结构,提高雪崩距离。图 4(c)是高取向性外延单晶氧化镓薄膜 X 射线探测器的雪崩增益机制^[83]。当 Au 电极施加电压时, Au-Ga₂O₃-Au 型探测器形成了背靠背的肖特基结,分别为正偏肖特基结(左边)和反偏肖特基结(右边)。肖特基结构形成空间电荷区,空间电荷区在入射光的照射下触发雪崩效应,器件电流快速上升。图 4(d)是不同 X 射线能量下探测器的暗电流和光电流。在反向偏压肖特基势垒作用下,随着电压的提高,暗电流呈先升高后饱和的趋势,饱和电压为 ~3 V。当电压大于 3 V 时,电荷载流子加速运动成为高能载流子,从而发生雪崩效应,探测器的雪崩增益为 17.6。

5.3 电子轰击诱导光电导效应

图 4(e)给出了由 ZnO 纳米冷阴极和氧化镓阳极组成的真空平板 X 射线探测器的结构,以及基于电子轰击诱导光电导效应(Electron Bombardment Induced Photoconductivity, EBIPC)的倍增探测机制^[79]。EBIPC 的光电倍增过程为:X 射线与氧化镓材料作用发生内光电效应,光电导材料中产生电子空穴对,降低了氧化镓阳极的电阻;氧化镓阳极电阻降低,使得加在冷阴极上的电场增加,诱发冷阴极电子源发射电子;场发射电子轰击氧化镓光电导阳极,在碰撞电离作用下产生大量电子空穴对,这个过程称为 EBIPC。在 EBIPC 作用下,

氧化镓光电导阳极的电阻进一步降低,从而诱发更高的阴极场发射电流,即形成正反馈过程,直至最后达到平衡^[86-87]。为了实现高增益的冷阴极真空 X 射线探测器,需要提高氧化镓的耐压特性和电阻率。图 4(f)是冷阴极真空 X 射线探测器的暗电流和光电流,计算得到探测器的内增益为 $2.4\times 10^4\%$ 。

6 氧化镓 X 射线探测器的应用研究

研究者探索了氧化镓 X 射线探测器在 X 射线剂量计、X 射线成像和可穿戴 X 射线传感器等方面的应用(图 5)^[46,49,88]。X 射线剂量计方面,Shao 等制备出基于 IGZO/a-Ga₂O₃ 异质结沟道的薄膜晶体管,开关比大于 10^9 ,场效应迁移率为 $0.2 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,亚阈值摆幅为 $0.3 \text{ V}\cdot\text{dec}^{-1}$ (图 5(a)~(b))^[49]。薄膜晶体管受到 X 射线辐照时,开启电压发生偏移,偏移灵敏度为 $110 \text{ V}\cdot\text{Gy}_{\text{air}}^{-1}$ 。另外,基于非晶氧化镓薄膜的 X 射线探测器的光电响应特性随着测试次数的增加而改变。器件在空气中高温退火后,其光电响应特性可实现恢复。X 射线成像方面,Liang 等利用磁控溅射方法制备出大面积均匀的非晶氧化镓薄膜,并结合商业非晶硅薄膜晶体管阵列制作出 64×64 的 X 射线成像器件,从而实现了大面积成像应用(图 5(c)~(i))^[46]。器件的成像分辨率为 $1.6 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。另外,器件在关闭 X 射线 60 s 后仍能保留成像图像,说明该器件可实现 X 射线成像检测和储存功能。可穿戴 X 射线传感器方面,Chen 等利用 CVD 方法制备出 In 掺杂的单晶氧化镓微米线,并利用单根微丝的柔性特性,展示了一种可穿戴 X 射线传感器(图 5(j)~(l))^[88]。该传感器可实时监测 X 射线,并可在用户界面上显示,验证了高性能柔性微米 X 射线检测设备的可行性。目前,尽管已经取得一些进展,但氧化镓 X 射线探测器的研究仍处于初期阶段。在实现商业化应用之前,还必须对氧化镓 X 射线探测器的制备工艺、光电转换机制和阵列集成等关键问题持续攻关。在单个探测器件应用中,针对氧化镓 X 射线探测器载流子浓度低和光电转换效率低等问题,需进一步优化氧化镓光电导材料的组分、缺陷和电学特性。在探测器阵列应用中,氧化镓光电导探测单元与驱动和读出电路的集成技术是实现实际应用的关键。随着制备和集成工艺趋于成熟和稳定,高性能氧化镓 X 射线探测器有望在医疗成像、工业检测、安全检查和科学研究等领域实现应用。

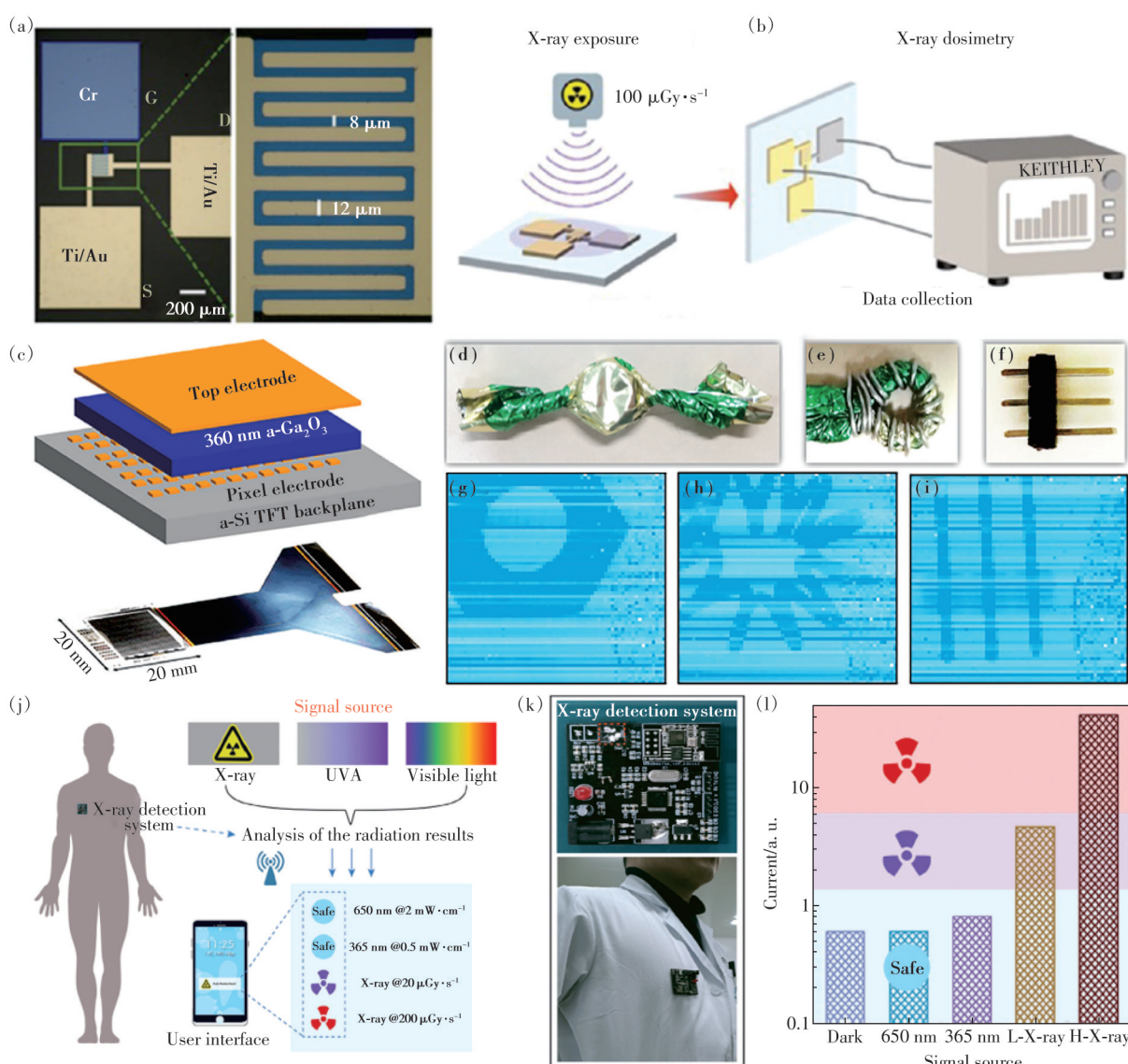


图5 氧化镓 X 射线探测器的应用研究。(a)~(b) X 射线剂量计;(c)~(i) X 射线成像;(j)~(l)可穿戴 X 射线传感器^[46,49,88]

Fig.5 Application studies of gallium oxide X-ray detectors. (a)~(b) X-ray dosimeters. (c)~(i) X-ray imaging. (j)~(l) Wearable X-ray sensors^[46,49,88]

7 总结与展望

氧化镓具有低能 X 射线吸收效率高、击穿电场高、物理化学稳定性高和兼容现代微加工工艺等优点,是实现直接转换 X 射线探测器的重要候选材料。然而,氧化镓 X 射线探测器的暗电流、灵敏度、探测极限和响应速度等特性还需进一步优化。材料制备方面,一方面需要降低氧化镓光电导薄膜材料中的缺陷,从而提高电荷收集效率和响应速度;另一方面,应利用元素掺杂提升氧化镓光电导材料的电导率和迁移率等电学特性,从而提高光电流和灵敏度。器件结构方面,器件参数还需进一步优化,从而调控探测器的光电转换效率。光电转换机制方面,基于氧化镓光电导增益

和雪崩增益的光电倍增机制可实现高灵敏度 X 射线探测,但对氧化镓光电导材料的要求比较苛刻。冷阴极真空 X 射线探测器的 EBIPC 光电倍增机制利用高能电子与光电导的相互作用,可实现高增益和高灵敏度 X 射线探测,但还需进一步开展理论和实验研究。另外,实现兼顾高增益和快速响应的氧化镓 X 射线探测器还需进一步研究。

在器件应用方面,实现大面积高灵敏度探测成像器件将是重要研究方向。根据大面积 X 射线探测成像器件的应用需求,非晶或多晶氧化镓薄膜可以兼顾大面积均匀性和高性能直接探测需求,它们可在较低温度下制备且与现有的半导体工艺兼容,容易与有源驱动和读出电路集成从

而制备出各种类型的 X 射线探测器阵列。而纳米晶氧化镓薄膜具有独特的结晶结构和尺寸效应,不仅能实现低成本大面积制备,而且在探测器的响应速度、暗电流和探测极限方面相比非晶材料具有明显优势。因此,大面积纳米晶氧化镓厚膜制备及其组分和缺陷控制、纳米晶氧化镓 X 射线光电转换机制和高性能探测器件结构、以及

大面积纳米晶氧化镓探测器阵列集成制作工艺等是实现高性能氧化镓 X 射线探测需要研究的核心问题。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250136>

参 考 文 献:

- [1] SHAJI A, FIDHA A, KUMARI, S, *et al.* Recent advancements in CT detectors: a comprehensive review [J]. *J. Clin. Diagn. Res.*, 2024, 18(2): TE01-TE05.
- [2] LI Y, WANG X, LIANG J, *et al.* Recent progress in direct X-ray detectors based on metal oxide wide bandgap semiconductors: a review [J]. *IEEE Sens. J.*, 2024, 24(23): 38569-38583.
- [3] LI S G, XIE X Y, XIONG J, *et al.* Review: perovskite X-ray detectors (1997-present) [J]. *Crystals*, 2022, 12(11): 1563.
- [4] NGUYEN V A, LE D H, DAMIAN D, *et al.* “In-situ” X-ray imaging technology for material and manufacturing science: a review [J]. *J. Manuf. Process.*, 2025, 141: 1245-1295.
- [5] KIM B J, SHAO B J, HOANG A T, *et al.* A flexible active-matrix X-ray detector with a backplane based on two-dimensional materials [J]. *Nat. Electron.*, 2025, 8(1): 147-156.
- [6] ZHAO J D, WANG X, LI Y W, *et al.* Substance discrimination imaging derived from switchable soft and hard X-ray sensing in direct X-ray detector [J]. *InfoMat*, 2025, 7(2): e12632.
- [7] STAUFER T, GRÜNER F. Review of development and recent advances in biomedical X-ray fluorescence imaging [J]. *Int. J. Mol. Sci.*, 2023, 24(13): 10990.
- [8] PAUWELS K, DOUISSARD P A. Indirect X-ray detectors with single-photon sensitivity [J]. *J. Synchrotron. Radiat.*, 2022, 29(6): 1394-1406.
- [9] LIU H L, LEE J, KANG J. Characteristics of a hybrid detector combined with a perovskite active layer for indirect X-ray detection [J]. *Sensors*, 2020, 20(23): 6872.
- [10] LEE J, YOO K, LIU H L, *et al.* Sensitivity improvement of hybrid active layer containing 2D nanoplatelets for indirect X-ray detector [J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(40): 405701.
- [11] KASAP S O, ROWLANDS J A. Review X-ray photoconductors and stabilized a-Se for direct conversion digital flat-panel X-ray image-detectors [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2000, 11(3): 179-198.
- [12] LIU S H, GAO C S, ZHANG X, *et al.* CMOS direct conversion X-ray detector coupled with fluorinated liquid [J]. *Nucl. Sci. Tech.*, 2025, 36(1): 1.
- [13] LI B Y, XIE M J, LU J, *et al.* Highly sensitive direct X-ray detector based on copper(II) coordination polymer single crystal with anisotropic charge transport [J]. *Small*, 2023, 19(42): 2302492.
- [14] TAFFELLI A, HEYL M, FAVARO M, *et al.* Demonstrating the high sensitivity of MoS₂ monolayers in direct X-ray detectors [J]. *APL Mater.*, 2023, 11(8): 081101.
- [15] SONG H Y, TAO K, JIA R, *et al.* Application of poly-Si/SiO_x passivating contact in X-ray silicon pixel detector [J]. *Appl. Phys. A*, 2022, 128(9): 808.
- [16] XIAOSONG X, TIAN Y, SHIMAZOE K, *et al.* Development of X-ray/Gamma-ray imaging system based on hydrogenated amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction strip detector [J]. *Radioisotopes*, 2015, 64(12): 729-735.
- [17] HAN Z, MUKHERJEE A, ALBERT A, *et al.* High spatial resolution direct conversion amorphous selenium X-ray detectors with monolithically integrated CMOS readout [J]. *J. Instrum.*, 2023, 18(4): P04021.
- [18] KABIR M Z, KASAP S O. DQE of photoconductive X-ray image detectors: application to a-Se [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2002, 35(21): 2735-2743.
- [19] KASAP S O, BELEV G. Progress in the science and technology of direct conversion X-ray image detectors: the development

- of a double layer a-Se based detector [J]. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 2007, 9(1): 1-10.
- [20] KAUPPINEN M, WINKLER A, LÄMSÄ V, *et al.* Characterization of seamless CdTe photon counting X-ray detector [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2021, 70: 4503811.
- [21] ORSINI F, IMAI Y, HATSUI T. Quantitative assessment of ohmic-type CdTe sensor response in a photon-counting X-ray imaging detector under continuous 12–49 keV irradiations [J]. *J. Synchrotron Radiat.*, 2025, 32(4): 951-960.
- [22] GORECKI A, BRAMBILLA A, MOULIN V, *et al.* Comparing performances of a CdTe X-ray spectroscopic detector and an X-ray dual-energy sandwich detector [J]. *J. Instrum.*, 2013, 8(11): P11011.
- [23] ZHANG Z P, ZHANG Z J, ZHENG W, *et al.* Sensitive and fast direct conversion X-ray detectors based on single-crystalline HgI₂ photoconductor and ZnO nanowire vacuum diode [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2020, 5(5): 1901108.
- [24] STREET R A, READY S E, VAN SCHUYLENBERGH K, *et al.* Comparison of PbI₂ and HgI₂ for direct detection active matrix X-ray image sensors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, 91(5): 3345-3355.
- [25] ZHANG Z J, ZHENG W, CHEN A Q, *et al.* Crystal growth of α -HgI₂ by the temperature difference method for high sensitivity X-ray detection [J]. *Cryst. Growth Des.*, 2015, 15(7): 3383-3387.
- [26] SUN H, LIU Y Z, GAO X Y, *et al.* Bendable 3D-structured X-ray photodetectors based on pure PbI₂ single crystal [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2021, 36(3): 035022.
- [27] ZHU X H, SUN H, YANG D Y, *et al.* Comparison of electrical properties of X-ray detector based on PbI₂ crystal with different bias electric field configuration [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2016, 27(11): 11798-11803.
- [28] ZHU X H, SUN H, YANG D Y, *et al.* Fabrication and characterization of X-ray array detectors based on polycrystalline PbI₂ thick films [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2014, 25(8): 3337-3343.
- [29] GRYNKO O, THIBAUT T, PINEAU E, *et al.* Engineering of a blocking layer structure for low-lag operation of the a-PbO-based X-ray detector [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2021, 68(5): 2335-2341.
- [30] PINEAU E, GRYNKO O, THIBAUT T, *et al.* Comparative analysis of multilayer lead oxide-based X-ray detector prototypes [J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 5998.
- [31] GRYNKO O, THIBAUT T, PINEAU E, *et al.* The X-ray sensitivity of an amorphous lead oxide photoconductor [J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 7321.
- [32] ZHANG J L, LI W J, YANG Y F, *et al.* Integrated underwater X-ray detector arrays fabricated by perovskite single-crystal arrays [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, doi:10.1002/adfm.202422003.
- [33] ZOU S Y, HUANG Y H, FANG Y C, *et al.* Vacuum-assisted blade coating MAPbI₃ homojunction thick film for highly sensitive X-ray detectors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, doi:10.1002/adfm.202424153.
- [34] LIN C F, HUANG K W, CHEN Y T, *et al.* Perovskite-based X-ray detectors [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(13): 2024.
- [35] THALHAMMER S, HÖRNER A, KÜß M, *et al.* GaN heterostructures as innovative X-ray imaging sensors-change of paradigm [J]. *Micromachines*, 2022, 13(2): 147.
- [36] WEI Y Q, XU W Z, QU H, *et al.* GaN-based low-energy X-ray single photon detector with photon energy resolution and fast response [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2024, 36(2): 123-126.
- [37] VENKATA PRASAD C, LABED M, ALAM SHAMIM SHAIKH M T, *et al.* Ga₂O₃-based X-ray detector and scintillators: a review [J]. *Mater. Today Phys.*, 2023, 35: 101095.
- [38] KIM M, KIM S, PARK J H, *et al.* Heteroepitaxial α -Ga₂O₃ thin film-based X-ray detector with metal-semiconductor-metal structure [J]. *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.*, 2025, 19(1): 2400193.
- [39] 李志伟, 唐慧丽, 徐军, 等. 超宽禁带半导体氧化镓基X射线探测器的研究进展 [J]. *人工晶体学报*, 2022, 51(3): 523-537, 570.
- LI Z W, TANG H L, XU J, *et al.* Research progress of ultra-wide band gap semiconductor Ga₂O₃-based X-ray detectors [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2022, 51(3): 523-537, 570. (in Chinese)
- [40] CHEN H, LI Z, ZHANG Z L, *et al.* Review of β -Ga₂O₃ solar-blind ultraviolet photodetector: growth, device, and application [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2024, 39(6): 063001.
- [41] WANG L Y, LIU S, LIU Z Y, *et al.* Observation of conductive interstitial Ga line defects in β -Ga₂O₃ [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(27): 2418230.
- [42] WU W T, HUANG H, WANG Y L, *et al.* Structure engineering of Ga₂O₃ photodetectors: a review [J]. *J. Phys. D: Appl.*

- Phys.*, 2025, 58(6): 063003.
- [43] HE Y J, ZHAO F Y, HUANG B, *et al.* A review of β -Ga₂O₃ power diodes [J]. *Materials*, 2024, 17(8): 1870.
- [44] ZHAI H C, WU Z Y, FANG Z L. Recent progress of Ga₂O₃-based gas sensors [J]. *Ceram. Int.*, 2022, 48(17): 24213-24233.
- [45] VOROBYEVA N, RUMYANTSEVA M, PLATONOV V, *et al.* Ga₂O₃(Sn) oxides for high-temperature gas sensors [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 2938.
- [46] LIANG H L, TANG X Y, SHAO H, *et al.* Retina-inspired X-ray optoelectronic synapse using amorphous Ga₂O₃ thin film [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(48): 2410761.
- [47] GAN Z Y, LI C, HOU X H, *et al.* Sensitive direct converting thin film X-ray detector utilizing β -Ga₂O₃ fabricated via MOCVD [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 125(19): 191102.
- [48] PENG Z X, HOU X H, HAN Z, *et al.* Ga₂O₃ photon-controlled diode for sensitive DUV/X-ray detection and high-resolution array imaging application [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(42): 2405277.
- [49] SHAO H, ZOU J H, LIANG H L, *et al.* Amorphous Ga₂O₃ semiconductor: a new solution for robust X-ray dosimeters [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(24): 2421730.
- [50] HANY I, YANG G, CHUNG C C. Fast X-ray detectors based on bulk β -Ga₂O₃ (Fe) [J]. *J. Mater. Sci.*, 2020, 55(22): 9461-9469.
- [51] TAYLOR N R, JI M, PAN L, *et al.* Large area vertical Ga₂O₃ Schottky diodes for X-ray detection [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Accel., Spectr., Detect. Assoc. Equip.*, 2021, 1013: 165664.
- [52] LIU Y M, PENG C, LIU C, *et al.* Improved-performance amorphous Ga₂O₃ photodetectors fabricated by capacitive coupled plasma-assistant magnetron sputtering [J]. *Coatings*, 2024, 14(9): 1204.
- [53] MEITEI S R, DEVI L S, SINGH N K. Nanocrystalline β -Ga₂O₃ thin film prepared by electron beam evaporation for enhanced photodetection [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2023, 56(39): 395104.
- [54] 赖黎, 莫慧兰, 符思婕, 等. 氧化镓微晶薄膜制备及其日盲深紫外探测器 [J]. *发光学报*, 2020, 41(9): 1165-1171.
- LAI L, MO H L, FU S J, *et al.* Preparation of gallium oxide microcrystalline thin films and its solar blind DUV photodetector [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(9): 1165-1171. (in Chinese)
- [55] VOGT P, HENSLING F V E, AZIZIE K, *et al.* Adsorption-controlled growth of Ga₂O₃ by suboxide molecular-beam epitaxy [J]. *APL Mater.*, 2021, 9(3): 031101.
- [56] HAN S H, MAUZE A, AHMADI E, *et al.* *n*-type dopants in (001) β -Ga₂O₃ grown on (001) β -Ga₂O₃ substrates by plasma-assisted molecular beam epitaxy [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2018, 33(4): 045001.
- [57] DERESHGI S A, LEE J, CENEDA D, *et al.* MOCVD-grown Ga₂O₃ thin films for polarization-sensitive infrared photonics [J]. *APL Mater.*, 2024, 12(1): 011125.
- [58] QIN Y, LI L H, ZHAO X L, *et al.* Metal-semiconductor-metal ϵ -Ga₂O₃ solar-blind photodetectors with a record-high responsivity rejection ratio and their gain mechanism [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(3): 812-820.
- [59] SHEORAN H, KAUSHIK J K, KUMAR V, *et al.* Investigation of traps in halide vapor-phase epitaxy-grown β -Ga₂O₃ epilayers/*n*⁺-Ga₂O₃ using deep-level transient spectroscopy [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2024, 39(12): 125007.
- [60] YAKIMOV E B, POLYAKOV A Y, NIKOLAEV V I, *et al.* Electrical and recombination properties of polar orthorhombic κ -Ga₂O₃ films prepared by halide vapor phase epitaxy [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(7): 1214.
- [61] KIM T, KIM Y, JEONG W C, *et al.* Effect of oxygen plasma on β -Ga₂O₃ deep ultraviolet photodetectors fabricated by plasma-assisted pulsed laser deposition [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2023, 5(5): 2590-2597.
- [62] LI K H, ALFARAJ N, KANG C H, *et al.* Deep-ultraviolet photodetection using single-crystalline β -Ga₂O₃/NiO heterojunctions [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(38): 35095-35104.
- [63] FENG Q J, DONG Z J, LIU W, *et al.* High responsivity solar-blind UV photodetector based on single centimeter-sized Sn-doped β -Ga₂O₃ microwire [J]. *Micro Nanostruct.*, 2022, 167: 207255.
- [64] YAO R C, WAN L Y, LI B S, *et al.* Temperature-dependent Raman-active phonon modes and electron-phonon coupling in β -Ga₂O₃ microwire [J]. *Appl. Phys. Express*, 2024, 17(1): 012004.
- [65] LIU Y Y, GUO X W, XIA N, *et al.* Floating particles in the melt during the growth of β -Ga₂O₃ single crystals using the Czochralski method [J]. *Metals*, 2022, 12(7): 1171.

- [66] BUTENKO P N, BOIKO M E, GUZILOVA L I, *et al.* Enhancing the perfection of bulk (100) β -Ga₂O₃ crystals grown by Czochralski method [J]. *J. Cryst. Growth*, 2024, 630: 127597.
- [67] FU B, JIAN G Z, MU W X, *et al.* Crystal growth and design of Sn-doped β -Ga₂O₃: morphology, defect and property studies of cylindrical crystal by EFG [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2022, 896: 162830.
- [68] FU B, MU W X, ZHANG J, *et al.* A study on the technical improvement and the crystalline quality optimization of columnar β -Ga₂O₃ crystal growth by an EFG method [J]. *CrystEngComm*, 2020, 22(30): 5060-5066.
- [69] HOSHIKAWA K, KOBAYASHI T, OHBA E, *et al.* 50 mm diameter Sn-doped (001) β -Ga₂O₃ crystal growth using the vertical Bridgman technique in ambient air [J]. *J. Cryst. Growth*, 2020, 546: 125778.
- [70] HOSHIKAWA K, KOBAYASHI T, MATSUKI Y, *et al.* 2-inch diameter (100) β -Ga₂O₃ crystal growth by the vertical Bridgman technique in a resistance heating furnace in ambient air [J]. *J. Cryst. Growth*, 2020, 545: 125724.
- [71] FAN Q, WANG L X, GAO X, *et al.* Enhanced scintillation performance of Cu-doped β -Ga₂O₃ single crystals grown by floating-zone method [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2024, 39(5): 055005.
- [72] PERRIER C, TRAORÉ A, ITO T, *et al.* Surface defects related to polishing cycle in β -Ga₂O₃ crystals grown by floating zone [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(22): 222105.
- [73] LIANG H L, CUI S J, SU R, *et al.* Flexible X-ray detectors based on amorphous Ga₂O₃ thin films [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 351-359.
- [74] CHEN M N, ZHANG Z P, ZHAN R Z, *et al.* Fast-response X-ray detector based on nanocrystalline Ga₂O₃ thin film prepared at room temperature [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2021, 554: 149619.
- [75] LU X, ZHOU L D, CHEN L, *et al.* X-ray detection performance of vertical Schottky photodiodes based on a bulk β -Ga₂O₃ substrate grown by an EFG method [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2019, 8(7): Q3046.
- [76] LU X, ZHOU L D, CHEN L, *et al.* Schottky X-ray detectors based on a bulk β -Ga₂O₃ substrate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(10): 103502.
- [77] ZHANG Z P, CHEN M N, ZHAN R Z, *et al.* Fabrication of nanocrystalline Ga₂O₃-NiO heterojunctions for large-area low-dose X-ray imaging [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2022, 604: 154623.
- [78] ZHANG S L, DENG Y X, CHEN L, *et al.* Self-powered fast response X-ray detector based on vertical p-NiO/Ga₂O₃ heterojunction diode [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2024, 36(4): 286-289.
- [79] ZHANG Z P, CHEN M N, BAI X P, *et al.* Sensitive direct-conversion X-ray detectors formed by ZnO nanowire field emitters and β -Ga₂O₃ photoconductor targets with an electron bombardment induced photoconductivity mechanism [J]. *Photonics Res.*, 2021, 9(12): 2420-2428.
- [80] ZHANG Z P, CHEN M N, WANG C Y, *et al.* Highly sensitive direct-conversion vacuum flat-panel X-ray detectors formed by Ga₂O₃-ZnO heterojunction cold cathode and ZnS target and their photoelectron multiplication mechanism [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9(9): 2102268.
- [81] LU C, JI X Q, LIU Z, *et al.* A review of metal-semiconductor contacts for β -Ga₂O₃ [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2022, 55(46): 463002.
- [82] WOO S, YEON E, RYU H Y, *et al.* High detectivity dual-band infrared photodetectors with dislocation-assisted photoconductive gain via hetero-epitaxial growth [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(22): 2419329.
- [83] ZHANG Z P, CHEN Z M, CHEN M N, *et al.* ϵ -Ga₂O₃ thin film avalanche low-energy X-ray detectors for highly sensitive detection and fast-response applications [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2021, 6(4): 2001094.
- [84] DONG J Q, WAN P, XIA W, *et al.* 1D core@shell radial heterojunction for unipolar barrier solar-blind avalanche photodetector [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(13): 2417865.
- [85] ZHANG Q Y, LI N, ZHANG T, *et al.* Enhanced gain and detectivity of unipolar barrier solar blind avalanche photodetector via lattice and band engineering [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 418.
- [86] ZHANG Z P, WANG K, ZHENG K S, *et al.* Electron bombardment induced photoconductivity and high gain in a flat panel photodetector based on a ZnS photoconductor and ZnO nanowire field emitters [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(10): 4147-4155.
- [87] ZHANG Z P, WANG K, ZHENG K S, *et al.* A flat panel photodetector formed by a ZnS photoconductor and ZnO nanowire field emitters achieving high responsivity from ultraviolet to visible light for indirect-conversion X-ray imaging [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2018, 36(20): 5010-5015.

- [88] CHEN Y C, NIU S F, LI Y, *et al.* Flexible single microwire X-ray detector with ultrahigh sensitivity for portable radiation detection system [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(40): 2404656.
- [89] CHEN X H, REN F F, GU S L, *et al.* Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(4): 381-415.
- [90] KHAN S A, IBRELJIC A, MARGIOTTA S, *et al.* Low-pressure CVD grown Si-doped β -Ga₂O₃ films with promising electron mobilities and high growth rates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 126(1): 012103.
- [91] ZENG H, MA C, WU M. Strain mediated ultra-high electron mobility in Ge-doped two-dimensional Ga₂O₃ [J]. *AIP Adv.*, 2024, 14(8): 085227.
- [92] ZHANG N J, LIU H Y, SAI Q L, *et al.* Structural and electronic characteristics of Fe-doped β -Ga₂O₃ single crystals and the annealing effects [J]. *J. Mater. Sci.*, 2021, 56(23): 13178-13189.
- [93] ZHOU X, YE L J, YUAN L, *et al.* Mg-doped α -Ga₂O₃ nanorods for the construction of photoelectrochemical-type self-powered solar blind UV photodetectors and underwater imaging application [J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(16): 2413074.
- [94] KASAP S, FREY J B, BELEV G, *et al.* Amorphous and polycrystalline photoconductors for direct conversion flat panel X-ray image sensors [J]. *Sensors*, 2011, 11(5): 5112-5157.
- [95] YU S J, LIU Y, HOU X H, *et al.* Stable Ga₂O₃ soft X-ray detector with ultrahigh responsivity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(18): 181111.
- [96] ZHANG C Y, DOU W J, YANG X, *et al.* X-ray detectors based on Ga₂O₃ microwires [J]. *Materials*, 2023, 16(13): 4742.
- [97] ZHOU L D, CHEN L, RUAN J L, *et al.* Pulsed X-ray detector based on Fe doped β -Ga₂O₃ single crystal [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021, 54(27): 274001.
- [98] CHEN J W, TANG H, LIU B, *et al.* High-performance X-ray detector based on single-crystal β -Ga₂O₃: Mg [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(2): 2879-2886.
- [99] LI Z W, CHEN J W, TANG H L, *et al.* Band gap engineering in β -Ga₂O₃ for a high-performance X-ray detector [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(10): 4630-4639.
- [100] CHEN J W, TANG H L, LI Z W, *et al.* Highly sensitive X-ray detector based on a β -Ga₂O₃: Fe single crystal [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(15): 23292-23299.
- [101] OUYANG X, ZHANG S L, BAI T, *et al.* Performance degradation of Ga₂O₃-based X-ray detector under gamma-ray irradiation [J]. *Micromachines*, 2025, 16(3): 339.
- [102] CHEN M N, ZHANG Z P, WEN B, *et al.* Low dark current and high stability X-ray detector based on FAPbI₃/Ga₂O₃ heterojunction [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2023, 941: 168989.
- [103] WANG Z W, HAN K J, HUANG H, *et al.* Interface-engineering induced swift and controllable solar-blind photoresponse in Ga₂O₃/SiC heterojunction based on unconventional rectification characteristics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(33): 2400498.
- [104] WANG X, LI L F, PENG H X, *et al.* Two-in-one functionality in a 28×28 β -Ga₂O₃ array: bias-voltage switching between photodetection and neuromorphic vision [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(22): 39515-39524.
- [105] ZHAO P F, TAN X, FU W L, *et al.* Investigation of electrical performance degradation of β -Ga₂O₃ Schottky barrier diodes induced by X-ray and neutron irradiation [J]. *Electronics*, 2025, 14(7): 1343.
- [106] HECHT K. Zum Mechanismus des lichtelektrischen Primärstromes in isolierenden Kristallen [J]. *Z. Phys.*, 1932, 77(3): 235-245.
- [107] DONG R, FANG Y J, CHAE J, *et al.* High-gain and low-driving-voltage photodetectors based on organolead triiodide perovskites [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(11): 1912-1918.
- [108] GOTOH Y, TSUJI H, NAGAO M, *et al.* Development of a field emission image sensor tolerant to gamma-ray irradiation [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2020, 67(4): 1660-1665.
- [109] MIYOSHI T, IGARASHI N, MATSUGAKI N, *et al.* Development of an X-ray HARP-FEA detector system for high-throughput protein crystallography [J]. *J. Synchrotron. Radiat.*, 2008, 15(3): 281-284.
- [110] HONDA Y, NANBA M, MIYAKAWA K, *et al.* Double-gated, Spindt-type field emitter with improved electron beam extraction [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2016, 63(5): 2182-2189.

- [111] BAI X P, ZHANG Z P, CHEN M N, *et al.* Theoretical analysis and verification of electron-bombardment-induced photo-conductivity in vacuum flat-panel detectors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2021, 39(8): 2618-2624.



张志鹏(1990-),男,广东茂名,博士,副教授,2019年于中山大学获得博士学位,主要从事光电探测与成像器件研究。

E-mail: zhangzhp25@mail.sysu.edu.cn



陈军(1969-),男,浙江舟山人,博士,教授,2004年于中山大学获得博士学位,主要从事冷阴极电子源及其真空微电子器件应用研究。

E-mail: stscjun@mail.sysu.edu.cn