

具有大光电导增益的氧化镓薄膜基 深紫外探测器阵列*

刘增^{1)2)†} 李磊¹⁾ 支钰崧³⁾ 都灵⁴⁾ 方君鹏⁵⁾ 李山¹⁾²⁾ 余建刚⁶⁾
张茂林¹⁾²⁾ 杨莉莉¹⁾²⁾ 张少辉⁷⁾ 郭宇锋^{1)2)‡} 唐为华^{1)2)††}

1) (南京邮电大学集成电路科学与工程学院, 南京 210023)

2) (南京邮电大学射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 南京 210023)

3) (中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

4) (金陵科技学院电子信息工程学院, 南京 211169)

5) (清华大学集成电路学院, 北京 100084)

6) (中北大学仪器与电子学院, 动态测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

7) (深圳大学物理与光电工程学院, 微纳光电子学研究院, 深圳 518060)

(2022 年 4 月 30 日收到; 2022 年 6 月 13 日收到修改稿)

氧化镓在深紫外探测方面具有天然的材料优势, 鉴于探测器阵列在光学成像等领域有着十分重要的用途, 本文主要介绍了一个五叉指电极结构的 4×4 氧化镓基深紫外探测器阵列. 氧化镓薄膜由金属有机化学气相沉积技术生长得到, 器件的加工通过紫外光刻、剥离和离子束溅射技术完成. 由此得到的氧化镓薄膜结晶度高且表面均匀. 探测器具有优异的深紫外光响应特性, 光响应度可达 2.65×10^3 A/W, 探测度达 2.76×10^{16} Jones, 同时还具有 $(1.29 \times 10^6)\%$ 的外量子效率, 光电导增益高达 12900; 16 个探测器单元的暗电流和光电流均具有良好的均匀性. 本文从光电性能和应用前景的角度说明了氧化镓深紫外探测器阵列的巨大应用潜力.

关键词: 氧化镓, 阵列探测器, 深紫外探测

PACS: 85.60.Gz, 52.70.Kz

DOI: 10.7498/aps.71.20220859

1 引言

由于阵列成像器在诸多领域的重要应用, 相关研究与发展也得到了学术界与工业界越来越多的重视^[1,2]. 成像探测器能将光学图像通过光电效应转换为可以便宜分析识别的电学信号^[3,4]. 在每一种器件制备的过程中, 材料的选择对于实现优异的

器件性能至关重要^[5,6]; 对于本文所要探讨的探测器器件而言, 材料的选择同样是一个不可避免的关键因素. 作为一种典型的宽禁带半导体氧化物半导体, 氧化镓 (Ga_2O_3) 在制备深紫外探测器方面得到了越来越多的关注; 这得益于紫外探测器在军民两用领域大量的实际应用需求^[7-9], 以及 Ga_2O_3 本身的许多优异材料特性^[10], 尤指它具有 4.8 eV 左右的禁带宽度, 恰好能够有效地响应于电磁波谱中的

* 南京邮电大学引进人才科研启动基金项目 (自然科学)(批准号: XK1060921115, XK1060921002)、国家自然科学基金 (批准号: 61774019) 和山西省基础研究计划 (批准号: 202103021223185) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zengliu@njupt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yfguo@njupt.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: whtang@njupt.edu.cn

深紫外波段^[11,12].

从目前的发展现状来看, 已经有多种结构的基于单晶衬底与薄膜的 Ga_2O_3 探测器阵列的报道^[13–18]. 例如, Zhi 等^[14] 设计了 16×4 的 Ga_2O_3 线性阵列探测器, 其光响应度 (responsivity, R) 达到 139.56 A/W , 探测度 (detectivity, D^*) 为 10^{15} Jones , 外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 为 68000% , 整个探测器的 64 个器件单元的 R 标准偏差为 10% 左右. Tak 等^[15] 在其阵列探测器中实现了 $9.1 \times 10^{-16} \text{ A/Hz}$ 的超低噪声和 88.5 dB 的线性动态范围 (linear dynamic range, LDR). Pratyush 等^[17] 基于 Ga_2O_3 单晶衬底制备的阵列探测器的 R 达到了 4 A/W , 但是尚未对过大的标准偏差给出解决方案. 此外, Ga_2O_3 阵列探测器的成像应用^[19–22] 也有一些初步的报道, 包括 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ^[19] 与非晶 Ga_2O_3 ^[20–22] 的器件; 成像通过遮挡板的使用记录每一个探测器单元的暗电流与光电流来实现. 在之前的研究中^[16], 4×4 的矩形 Ga_2O_3 阵列探测器展现出了 634.15 A/W 的高响应度以及 2300 左右的光电增益, 表明该器件具有高效的载流子输运和收集水平. 然而, R 的标准偏差将近 20% . 对于其在光学成像中的应用而言, 高的光响应度、快速的响应以及低的标准偏差都是必不可少的关键参数^[23].

本工作通过使用金属有机化学气相沉积 (metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD) 技术来制备 Ga_2O_3 薄膜, 所使用的衬底为 (0001) 面蓝宝石衬底. 再利用紫外光刻、剥离和离子束溅射等微纳加工方法制备 Ga_2O_3 基深紫外探测器阵列. 薄膜的质量将通过 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD)、扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM), 原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 以及紫外-可见光吸收光谱 (UV-visible absorbance spectrum, UV-vis) 来检验. 每一个探测器单元的光电特性将通过 Keithley 4200 半导体测试设备完成, 包括电流-电压 (I - V) 特性曲线以及动态光响应特性 (I - t).

2 实验方法

本文中所使用的 Ga_2O_3 薄膜由金属有机化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 技术制备得到^[24,25], 制备的腔室温

度与气压分别为 $760 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 25 Torr ($1 \text{ Torr} = 1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$), 在生长过程中根据安托万方程 (Antoine's equation)^[26], 氧与镓 $[\text{O}/\text{Ga}]$ 的摩尔质量比约为 1650 . Ga_2O_3 薄膜晶体的晶体质量 (包括衍射峰、表面形貌与粗糙度等) 通过 XRD, SEM, AFM 等测试手段完成; 其光学带隙通过紫外-可见光吸收光谱测得^[27,28].

阵列探测器的制备通过紫外光刻、剥离技术以及离子束溅射等手段实现. 对称的双层的 Ti/Au 电极沉积在 Ga_2O_3 薄膜的表面; 电极形貌为五指的叉指型图形, 每指长 $190 \text{ }\mu\text{m}$, 宽 $10 \text{ }\mu\text{m}$, 指间间距为 $5 \text{ }\mu\text{m}$, 叉指到电极背的距离为 $10 \text{ }\mu\text{m}$, 因此每一个探测器单元的有效光照面积 (S) 为 $10^4 \text{ }\mu\text{m}^2$. 探测器的光电性能, 包括电流-电压特性 (I - V) 曲线和动态响应 (I - t) 曲线, 通过半导体测试设备 Keithley 4200 来完成, 所使用的紫外光源的光强可以通过改变测试样品与光源之间的距离来调控.

3 结果分析

图 1(a) 所示为 Ga_2O_3 薄膜的 XRD 图. 从图 1(a) 可以看出 3 个平行的晶面, 即 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的 (201) 面、($\bar{4}02$) 面和 ($\bar{6}03$) 面, 3 个面对应的半高宽 (FWHM) 分别为 0.21° , 0.39° 和 0.52° ; 图中额外的一个很强的衍射峰来自沉积薄膜使用的 (0001) 面蓝宝石衬底. 图 1(b) 所示为 Ga_2O_3 薄膜表面的 SEM 图, 可以看到边界清晰的棒状晶粒. 由图 1(c) 的 AFM 图可以看出其表面的平均粗糙度 (RMS) 为 4.15 nm . 这些结果表明这里制备的 Ga_2O_3 薄膜具有良好的晶体质量, 这是制备优异性能器件的十分关键的材料基础^[29]. 对于一般的半导体材料而言, 光学带隙与吸收系数之间满足 Tauc 关系式, 对于直接带隙的 Ga_2O_3 而言, 其通常表达为^[30]

$$(\alpha h\nu)^2 = B(h\nu - E_g), \quad (1)$$

其中, α 为吸收系数, $h\nu$ 为入射光子能, B 是常量, E_g 为光学带隙. 通过对 $(\alpha h\nu)^2$ 与光子能 $h\nu$ 的关系曲线采用外推法 (如图 1(d) 所示) 可以得出 Ga_2O_3 薄膜的 E_g 约为 4.89 eV . 从上述的参数来看, 本工作中所制备的优质 Ga_2O_3 薄膜为实现高性能探测器阵列器件提供了保证.

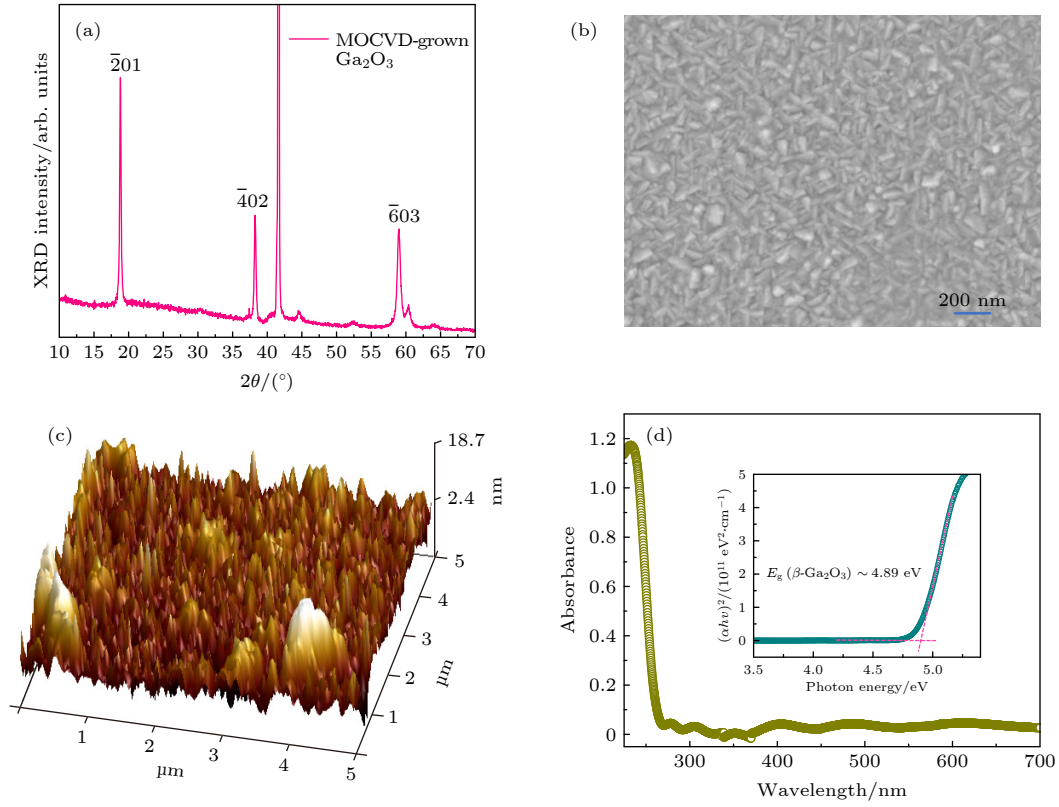


图 1 MOCVD 生长的 Ga_2O_3 薄膜 (a) XRD 图; (b) 表面 SEM 图; (c) 表面 AFM 图; (d) 紫外-可见光吸收光谱, 内插图为 $(\alpha h\nu)^2$ 和 $h\nu$ 的函数曲线

Fig. 1. The MOCVD-grown Ga_2O_3 thin film: (a) The XRD pattern; (b) surface SEM image; (c) AFM image; (d) UV-vis absorbance spectrum, The inset is the relationship of $(\alpha h\nu)^2$ and $h\nu$.

本工作在 2 in (1 in = 2.54 cm) 的蓝宝石衬底上制备了 6 只 Ga_2O_3 探测器阵列, 其平面结构示意图如图 2(a) 所示. 图 2(b) 为图 2(a) 蓝色框中一只在本文中用以分析和讨论的探测器阵列的示意图, 其具体的器件尺寸已经在实验部分给出; 图 2(c) 为图 2(b) 中红色框中的局部放大图. 其中,

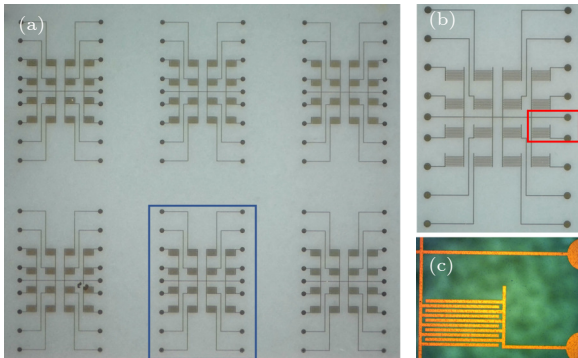


图 2 (a) 2 in 薄膜上制备的 6 只 Ga_2O_3 探测器阵列的平面结构示意图; (b) 图 (a) 蓝色框内探测器阵列的结构示意图; (c) 图 (b) 中红色框局部放大图

Fig. 2. (a) The schematic diagrams of the six Ga_2O_3 photo-detector arrays; (b) the enlarged portion of blue mark in figure (a); (c) the enlarged portion of red mark in Fig. (b).

电极图形清晰且界限明显.

图 3 所示为 Ga_2O_3 探测器阵列的光响应特性. 其中, 图 3(a) 为其线性的 I - V 特性曲线, 其光电特性类似于一个光敏电阻, 因此这种探测器被称为光电导型探测器. 在 10 V 偏压下的暗电流 (I_{dark}) 低至 2.89 pA; 将暗电流作为探测器噪声的主要来源, 如此低的 I_{dark} 说明了制备的探测器具有低的噪声, 这是关乎探测器器件灵敏性的关键参数. 一般来说, 通常利用光响应参数 R , D^* 和 EQE 来描述一个探测器的性能^[31,32], 它们通常被定义为

$$R = \frac{I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}}{P_{\text{light}} \cdot S}, \quad (2)$$

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2qI_{\text{dark}}/S}}, \quad (3)$$

$$\text{EQE} = \frac{hcR}{q\lambda} \times 100\%, \quad (4)$$

其中, P_{light} 是入射光的光强, S 为探测器的有效光照射面积, h 为普朗克常量, c 为光速, q 为电子电荷, λ 为入射光波长. 当入射光光强为 $1500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 其光电流 (I_{photo}) 为 $3.98 \times 10^{-4} \text{ A}$, 故得出其 R 为

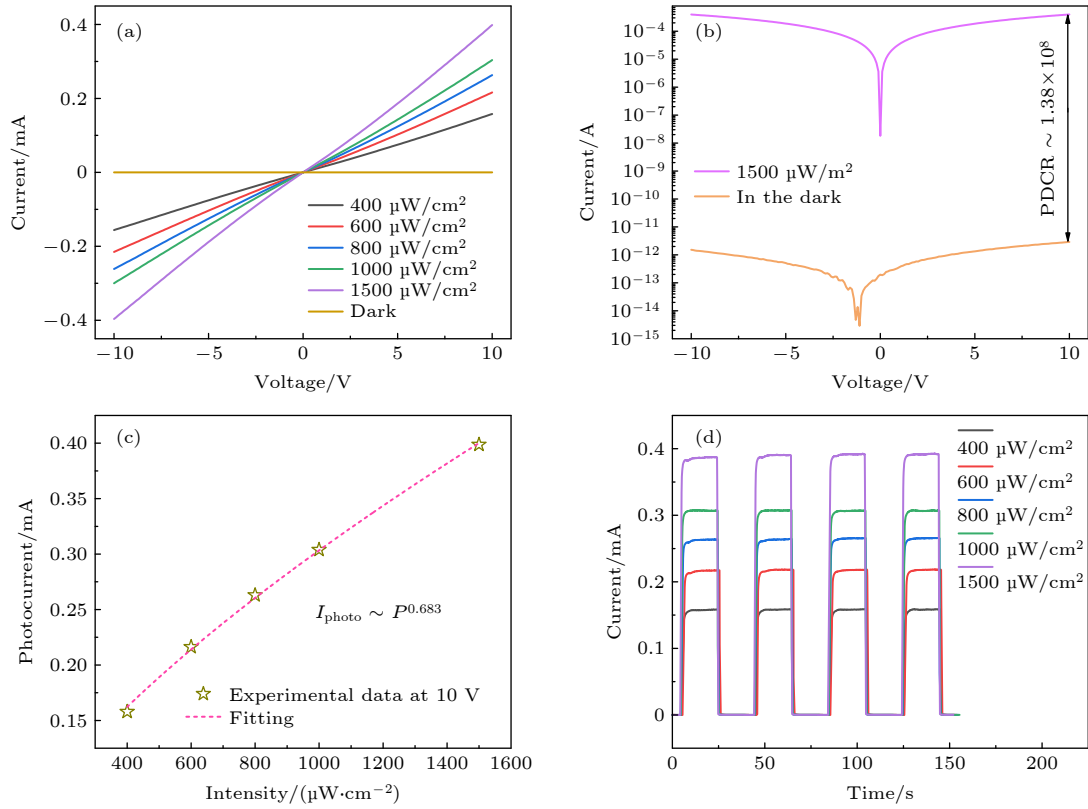

 图 3 Ga_2O_3 探测器阵列 (a) 线性 I - V 特性曲线; (b) 对数 I - V 特性曲线; (c) 光电流与光强的关系图; (d) 动态响应图

Fig. 3. (a) The linear I - V ; (b) semi-log I - V ; (c) the relationship of photocurrent and light intensity; (d) the time-resolved transient photo response of the Ga_2O_3 photodetector array.

$2.65 \times 10^3 \text{ A/W}$, 说明探测器对 254 nm 的紫外光具有很高的探测灵敏度. 通过计算, D^* 为 $2.76 \times 10^{16} \text{ Jones}$, 说明该探测器能够探测超低光强的光信号的能力. EQE 为 $(1.29 \times 10^6)\%$, 表明这个探测器中每一个入射的光子都能够有效地激发出电子-空穴对, 也即入射光与 Ga_2O_3 进行了有效的耦合作用. 从这些性能指标能够看出, 这里介绍的 Ga_2O_3 探测器阵列 (其中的一个探测器单元) 的深紫外光响应特性指标优异. 从图 3(b) 所示的对数形式的 I - V 曲线可以看出其光暗电流比 (photo-to-dark current ratio, PDCR) 高达 1.38×10^8 , 在有光照和无光照条件下输出电流出现如此大的比值主要得益于入射光子对 Ga_2O_3 半导体中载流子的有效激发, 探测器的光响应性能佳. 图 3(c) 为 I_{photo} 随光强变化的关系图, 根据幂律定律 [33]:

$$I_{\text{photo}} \sim P_{\text{light}}^{\theta} \quad (5)$$

本工作中, θ 为 0.683, 说明 I_{photo} 与入射光光强是近线性关系, 随着光强的增大, I_{photo} 并没有随着线性提高 (θ 为 1 时, 为标准的线性关系); 主要原因可能是在更高的光强入射光照射下, 更多的光

生电子与空穴会出现的同样体积的材料中, 出现比低光强入射光照射情形下更严重的载流子散射, 散射过程会增大光生电子与空穴的接触概率, 继而在此过程中会出现过多的电子与空穴复合的现象 [34]. 在光强为 $800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, $\text{LDR} = 20 \lg(I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}})$, LDR 为 145.78 dB. 如图 3(d), 其为在不同的入射光光强照射下, 探测器的瞬态光响应特性图; 可以看出, 在所有光强的光照射下探测器均能展现稳定且可重复的光开关特性; 并且, 随着入射光光强的增大, 光电流增大, 因为在固定的偏压驱动下 (10 V) 更强光强的入射光能够激发更多的光生电子-空穴对 [35]. 时间拟合公式 $I = I_0 + Ae^{-t/\tau}$, 其中 I_0 为饱和光电流, A 为常数, t 为时间, τ 为弛豫时间常数; 在偏压为 10 V, 光强为 $1500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的情况下, 上升和下降时间分别为 0.36 s 和 0.26 s.

此外, 当考虑所有入射光子都被探测器表面所吸收 (即认为内量子效率为 100%), 光电导增益 (gain, G) 依据如下定义:

$$G = \frac{(I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}})/e}{P_{\text{light}} \cdot S/(h\nu)}, \quad (6)$$

其中, $h\nu$ 为入射光子的光子能量. G 所表达的物理意义就是每个具有光子能 $h\nu$ 的光子入射到器件表面, 激发光生载流子后被探测器的电极所收集的载流子数; 用以着重描述由于光激发而生成的电子-空穴对当中, 通过探测器中的电极与半导体接触部分的载流子数; 因此可以根据实验数据得出本工作中的 G 为 12900, 一般探测器的量子效率不会大于 1, 但是在外加电压驱动下, 一个入射光子不仅仅激发一个光生载流子时, 就会出现 EQE 大于 1 的情况, 同时会出现光生载流子的倍增现象. 假设入射光子全部被吸收. 如此远大于 1 的 G 可能由于光生电子在复合之前在电路中持续运动的时间比较长而导致的; 对于 n 型半导体材料 Ga_2O_3 而言, 作为少数载流子的空穴会在 Ga_2O_3 薄膜材料中被束缚以至不能迅速地与非平衡状态下的多数载流子电子发生复合, 致使电子在这个过程中出现在电极间循环传输的现象, 这种现象虽然使得探测器的 G 很高, 但同时也会带来探测器的持续光电导效应^[36], 会严重影响到探测器的响应速度. 因此, 能够在高光响应 (响应度与增益) 与快速响应之间找到折衷的优选办法仍然是需要解决的问题.

图 4 所示为 10 V 偏压下, 探测器阵列在不同光强的入射光照射下的光电流与暗电流. 可以看出, 暗电流几乎没有变化; 在不同的光强的入射光照射下, 随着光强的增大, 光电流也随着增大; 在相同光强的照射下, 光电流的变化不大. 例如, 在 $1500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光强的紫外光辐照下, 其最大和最小光电流分别为 $3.999 \times 10^{-4} \text{ A}$ 和 $3.905 \times 10^{-4} \text{ A}$.

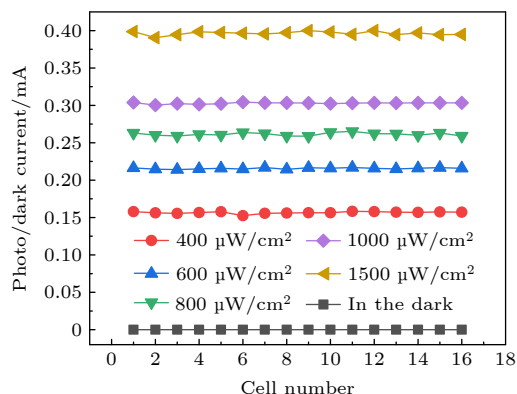


图 4 10 V 偏压下, 16 个探测器单元在不同光强的入射光照射下暗电流与光电流的统计数值

Fig. 4. The statistic photo and dark current of the 16 photodetector cells at 10 V, under the illuminations with various light intensities.

如此小的偏差主要得益于制备的 Ga_2O_3 薄膜的低的 RMS 以及加工工艺的稳定性, 这为探测器阵列在如光学成像等实际应用领域提供了坚实的基础.

4 结 论

本文报道了具有高深紫外光响应性能的 Ga_2O_3 探测器阵列器件. 得益于较好的薄膜晶体质量与加工工艺的稳定性, 探测器阵列的光响应度为 $2.65 \times 10^3 \text{ A/W}$, 探测度为 $2.76 \times 10^{16} \text{ Jones}$, 外量子效率为 $1.29 \times 10^6\%$, 光电导增益远大于 1, 16 个探测器单元的输出电流具有超高的均匀性, 综合性能优异. 这些结果证明了本文介绍的器件具备优异的性能和执行深紫外光探测的巨大潜力, 以及在光学成像领域获得进一步发展的基础. 探测器作为光学成像系统中的核心元件, 除高的光响应性能外, 还需要有足够的像素点以保证成像清晰. 本文中介绍的 4×4 阵列仅有 16 个像素点, 因此更大面积的探测器的阵列的制备显得尤为关键, 然而这类器件对材料的大面积均匀性和加工工艺的稳定性要求更高, 有待在后续工作中加以解决.

参考文献

- [1] McClintock R, Mayes K, Yasan A, Shiell D, Kung P, Razeghi M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011117
- [2] Ge H N, Xie R Z, Guo J X, Li Q, Yu Y Y, He J L, Wang F, Wang P, Hu W D 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 110703 (in Chinese) [葛浩楠, 谢润章, 郭家祥, 李庆, 余羿叶, 何家乐, 王芳, 王鹏, 胡伟达 2022 物理学报 **71** 110703]
- [3] Li L, Ye S, Qu J, Zhou F, Song J, Shen G 2021 *Small* **17** 2005606
- [4] Zhang Z, Lin C, Yang X, Tian Y, Gao C, Li K, Zang J, Yang X, Dong L, Shan C 2021 *Carbon* **173** 427
- [5] Konstantatos G, Sargent E H 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 391
- [6] Guo D Y, Li P G, Chen Z W, Wu Z P, Tang W H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 078501 (in Chinese) [郭道友, 李培刚, 陈政委, 吴真平, 唐为华 2019 物理学报 **68** 078501]
- [7] Chen X, Ren F, Gu S, Ye J 2019 *Photon. Res.* **7** 381
- [8] Xu J, Zheng W, Huang F 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 8753
- [9] Liu Z 2021 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [刘增 2021 博士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [10] Liu Z, Li P G, Zhi Y S, Wang X L, Chu X L, Tang W H 2019 *Chin. Phys. B* **28** 017105
- [11] Yuan Y, Hao W, Mu W, Wang Z, Chen X, Liu Q, Xu G, Wang C, Zhou H, Zou Y, Zhao X, Jia Z, Ye J, Zhang J, Long S, Tao X, Zhang R, Hao Y 2021 *Fundam. Res.* **1** 697
- [12] Lu H, Zhang R 2021 *Wide Band Gap Semiconductor UV Photodetector* (Xi'an: Xidian University Press) p164 (in Chinese) [陆海, 张荣 2021 宽禁带半导体紫外光电探测器 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第164页]

- [13] Peng Y, Zhang Y, Chen Z, Guo D, Zhang X, Li P, Wu Z, Tang W 2018 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **30** 993
- [14] Zhi Y S, Liu Z, Zhang S H, Li S, Yan Z Y, Li P G, Tang W H 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 3435
- [15] Tak B R, Singh R 2021 *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** 2145
- [16] Liu Z, Zhi Y S, Zhang M L, Yang L L, Li S, Yan Z Y, Zhang S H, Guo D Y, Li P G, Guo Y F, Tang W H 2022 *Chin. Phys. B* **31** 088503
- [17] Pratiyush A S, Muazzam U U, Kumar S, Vijayakumar P, Ganesamoorthy S, Subramanian N, Muralidharan R, Nath D N 2019 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **31** 923
- [18] Chen Y, Lu Y, Liao M, Tian Y, Liu Q, Gao C, Yang C, Shan C 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1906040
- [19] Chen Y C, Lu Y J, Liu Q, Lin C N, Guo J, Zang J H, Tian Y Z, Shan C X 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 2557
- [20] Qin Y, Li L H, Yu Z, Wu F, Dong D, Guo W, Zhang Z, Yuan J H, Xue K H, Miao X, Long S 2021 *Adv. Sci.* **80** 2101106
- [21] Qin Y, Long S, He Q, Dong H, Jian G, Zhang Y, Hou X, Tan P, Zhang Z, Lu Y, Shan C, Wang J, Hu W, Lv H, Liu Q, Liu M 2019 *Adv. Electron. Mater.* **5** 1900389
- [22] Hou X, Zhao X, Zhang Y, Zhang Z, Liu Y, Qin Y, Tan P, Chen C, Yu S, Ding M, Xu G, Hu Q, Long S 2022 *Adv. Mater.* **34** 2106923
- [23] Tong L, Huang X, Wang P, Ye L, Peng M, An L, Sun Q, Zhang Y, Yang G, Li Z, Zhong F, Wang F, Wang Y, Motlag M, Wu W, Cheng G J, Hu W 2020 *Nat. Commun.* **11** 2308
- [24] Liu Z, Zhi Y, Li S, Liu Y, Tang X, Yan Z, Li P, Li X, Guo D, Wu Z, Tang W 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 085105
- [25] Liu Z, Li S, Yan Z, Liu Y, Zhi Y, Wang X, Wu Z, Li P, Tang W 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 5071
- [26] Li Z, Jiao T, Hu D, Lv Y, Li W, Dong X, Zhang Y, Feng Z, Zhang B 2019 *Coatings* **9** 281
- [27] Ma H L, Su Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 116701 (in Chinese) [马海林, 苏庆 2014 物理学报 **63** 116701]
- [28] Feng Q J, Li F, Li T T, Li Y Z, Shi B, Li M K, Liang H W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 218101 (in Chinese) [冯秋菊, 李芳, 李彤彤, 李昀铮, 石博, 李梦轲, 梁红伟 2018 物理学报 **67** 218101]
- [29] Wager J F 2003 *Science* **300** 1245
- [30] Zhou S R, Zhang H, Mo H L, Liu H W, Xiong Y Q, Li H L, Kong C Y, Ye L J, Li W J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 178503 (in Chinese) [周树仁, 张红, 莫慧兰, 刘浩文, 熊元强, 李泓霖, 孔春阳, 叶利娟, 李万俊 2021 物理学报 **70** 178503]
- [31] Li X H, Zhang M, Yang J, Xing S, Gao Y, Li Y Z, Li S Y, Wang C J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 048501 (in Chinese) [李秀华, 张敏, 杨佳, 邢爽, 高悦, 李亚泽, 李思雨, 王崇杰 2022 物理学报 **71** 048501]
- [32] Ouyang X P, Wang L, Fan R Y, Zhang Z B, Wang W, Lv F X, Tang W Z, Chen G C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2170 (in Chinese) [欧阳晓平, 王兰, 范如玉, 张忠兵, 王伟, 吕反修, 唐伟忠, 陈广超 2006 物理学报 **55** 2170]
- [33] Li S, Guo D, Li P, Wang X, Wang Y, Yan Z, Liu Z, Zhi Y, Huang Y, Wu Z, Tang W 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 35105
- [34] Liu Z, Wang X, Liu Y, Guo D, Li S, Yan Z, Tan C K, Li W, Li P, Tang W 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 13920
- [35] Li S, Yan Z Y, Tang J C, Yue J Y, Liu Z, Li P G, Guo Y F, Tang W H 2022 *IEEE Trans. Electron Devices* **69** 2443
- [36] Qiao B, Zhang Z, Xie X, Li B, Chen X, Zhao H, Liu K, Liu L, Shen D 2021 *J. Mater. Chem. C* **9** 4039

Gallium oxide thin film-based deep ultraviolet photodetector array with large photoconductive gain^{*}

Liu Zeng^{1)2)†} Li Lei¹⁾ Zhi Yu-Song³⁾ Du Ling⁴⁾ Fang Jun-Peng⁵⁾
 Li Shan¹⁾²⁾ Yu Jian-Gang⁶⁾ Zhang Mao-Lin¹⁾²⁾ Yang Li-Li¹⁾²⁾
 Zhang Shao-Hui⁷⁾ Guo Yu-Feng^{1)2)‡} Tang Wei-Hua^{1)2)††}

1) (*College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

2) (*National and Local Joint Engineering Laboratory for RF Integration and Micro-Packing Technologies, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

3) (*China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China*)

4) (*School of Electronic and Information Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China*)

5) (*School of Integrated Circuits, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

6) (*State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

7) (*Institute of Microscale Optoelectronics, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

(Received 30 April 2022; revised manuscript received 13 June 2022)

Abstract

Gallium oxide (Ga_2O_3) has the natural advantages in deep ultraviolet absorbance for performing deep ultraviolet photodetection. Owing to the vital application of photodetector array in optical imaging, in this work, we introduce a 4×4 Ga_2O_3 -based photodetector array with five-finger interdigital electrodes, in which the high-quality and uniform Ga_2O_3 thin film is grown by using metal-organic chemical vapor deposition technique, and the device is fabricated by using the following methods: ultraviolet photolithography, lift-off, and ion beam sputtering. The photodetector cell possesses a responsivity of 2.65×10^3 A/W, a detectivity of 2.76×10^{16} Jones, an external quantum efficiency of $(1.29\times 10^6)\%$, and a photoconductive gain as high as 12900. The 16-cells in this array show good uniformity. In this work the great application potential of gallium oxide deep ultraviolet detector array is illustrated from the perspective of optoelectronic performance and application prospect.

Keywords: gallium oxide, photodetector array, deep ultraviolet detection

PACS: 85.60.Gz, 52.70.Kz

DOI: 10.7498/aps.71.20220859

* Project supported by the Natural Science Research Start-up Foundation of Recruiting Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Grant Nos. XK1060921115, XK1060921002), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61774019), and the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202103021223185).

† Corresponding author. E-mail: zengliu@njupt.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yfguo@njupt.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: whtang@njupt.edu.cn



具有大光电导增益的氧化镓薄膜基深紫外探测器阵列

刘增 李磊 支钰崧 都灵 方君鹏 李山 余建刚 张茂林 杨莉莉 张少辉 郭宇锋 唐为华

Gallium oxide thin film-based deep ultraviolet photodetector array with large photoconductive gain

Liu Zeng Li Lei Zhi Yu-Song Du Ling Fang Jun-Peng Li Shan Yu Jian-Gang Zhang Mao-Lin
Yang Li-Li Zhang Shao-Hui Guo Yu-Feng Tang Wei-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 208501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220859

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220859>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超宽禁带半导体 β -Ga₂O₃ 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展

Ultra-wide bandgap semiconductor of β -Ga₂O₃ and its research progress of deep ultraviolet transparent electrode and solar-blind photodetector

物理学报. 2019, 68(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181845>

势垒可调的氧化镓肖特基二极管

Barrier-tunable gallium oxide Schottky diode

物理学报. 2022, 71(3): 037301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211536>

基于云母衬底生长的非晶Ga₂O₃柔性透明日盲紫外光探测器研究

Flexible transparent solar blind ultraviolet photodetector based on amorphous Ga₂O₃ grown on mica substrate

物理学报. 2021, 70(23): 238502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211039>

NiO/GaN p-n结紫外探测器及自供电技术

NiO/GaN p-n junction ultraviolet photodetector and self-powered technology

物理学报. 2021, 70(12): 128502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210154>

适用400 Gbit/s接收系统的铟磷基低暗电流高带宽倏逝波耦合光电探测器阵列

Low dark current and high bandwidth evanescent wave coupled PIN photodetector array for 400 Gbit/s receiving system

物理学报. 2021, 70(20): 208501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210781>

基于机械剥离 β -Ga₂O₃ 的Ni/Au垂直结构肖特基器件的温度特性

Temperature dependent characteristics of Ni/Au vertical Schottky diode based on mechanically exfoliated beta-Ga₂O₃ single crystal

物理学报. 2020, 69(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200424>