

Cu 掺杂  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的制备及紫外探测性能\*刘玮<sup>1)</sup> 冯秋菊<sup>1)†</sup> 宜子琪<sup>1)</sup> 俞琛<sup>1)</sup> 王硕<sup>1)</sup>  
王彦明<sup>1)</sup> 隋雪<sup>1)</sup> 梁红伟<sup>2)</sup>

1) (辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029)

2) (大连理工大学微电子学院, 大连 116024)

(2023 年 6 月 12 日收到; 2023 年 8 月 9 日收到修改稿)

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为第三代宽禁带半导体材料, 具有禁带宽度大 (4.9 eV)、击穿电场强, 吸收边正好位于日盲紫外波段 (波长 200—280 nm) 内, 且在近紫外以及整个可见光波段具有较高的透过率, 使得  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是一种非常适合作为日盲紫外光电探测器的材料. 目前在 p 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料方面的研究还较少, 但 p 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料的制备对于其光电器件的应用至关重要, 因此成功制备 p 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料就显得尤为关键. 采用化学气相沉积法在蓝宝石衬底上生长出不同 Cu 掺杂量的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 并对薄膜的形貌、晶体结构和光电特性进行了测试. 发现随着 Cu 掺杂量的增加, 样品 (201) 晶面的衍射峰向小角度方向发生了移动, 这说明 Cu<sup>2+</sup> 替代了 Ga<sup>3+</sup> 进入到了 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶格中. 此外, 在 Cu 掺杂  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜上蒸镀 Au 作为叉指电极, 制备出了金属-半导体-金属结构光电导型日盲紫外探测器, 并对其紫外探测性能进行了研究. 结果表明, 在 10 V 偏压、254 nm 波长紫外光下, 器件的光暗电流比约为  $3.81 \times 10^2$ , 器件的上升时间和下降时间分别是 0.11 s 和 0.13 s. 此外, 在光功率密度为 64  $\mu$ W/cm<sup>2</sup> 时, 器件的响应度和外部量子效率分别是 1.72 A/W 和 841%.

**关键词:** 化学气相沉积法, p 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu 掺杂, 紫外光电探测器**PACS:** 85.60.Gz, 81.15.Gh, 61.82.Fk**DOI:** 10.7498/aps.72.20230971

## 1 引言

日盲紫外探测器具有虚警率低、探测灵敏度高和背景噪声低等多个优点, 被广泛应用于环境监测、导弹跟踪、无线通信、生化检测和空间系统等方面, 引起了国内外众多科研工作者的极大兴趣<sup>[1-4]</sup>. 目前, 主要以宽禁带半导体材料 (ZnMgO, AlGaN 和  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 来制备日盲紫外探测器<sup>[5-7]</sup>, 其中 ZnMgO 只能对在波长为 200—370 nm 内的紫外光进行探测, 而 AlGaN 的生长温度较高, 又缺少与之相匹配的衬底, 很难制备出高质量的 AlGaN 薄

膜.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为一种 III-VI 族半导体材料, 带隙为 4.9 eV, 截止波长正好位于日盲紫外波段内, 且具有击穿电场强 (8 MV/cm)、导电性能良好和化学性能稳定等优点<sup>[8,9]</sup>, 使其在紫外探测器方面具有优异的发展前景.

由于  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 存在氧空位缺陷, 是一种本征 n 型氧化物半导体材料, 但对于 p 型掺杂  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的制备却非常的困难, 然而对于  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料的器件应用而言, p 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的成功制备就显得至关重要. 目前, 关于 p 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的研究还很少. 2017 年, Qian 等<sup>[10]</sup> 利用射频磁控溅射法首次生长出了 Mg 掺杂  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 研究发现该薄膜表现出弱

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12075045)、辽宁省自然科学基金 (批准号: 2020-MS-243)、大连市科技创新基金项目 (批准号: 2022JJ12GX023) 和辽宁师范大学 2022 年高端科研成果培育资助计划 (批准号: 22GDL002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjfeng@dlut.edu.cn

p 型. 2023 年, Wang 等<sup>[11]</sup> 利用射频磁控溅射法在不同沉积温度下, 在蓝宝石衬底上制备了 Zn 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜, 研究发现 n 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜为 p 型, 但与未掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  膜相比, Zn 掺杂的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  膜的载流子浓度和迁移率都较低. 2021 年, Zhang 等<sup>[12]</sup> 基于第一性原理和偶极子修正的理论计算得出, Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜可能是 p 型半导体材料. 目前还未见有关于采用化学气相沉积 (CVD) 法制备 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的相关报道. 本文利用 CVD 法在蓝宝石衬底上生长出了 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜, 研究了不同 Cu 掺杂量对薄膜的形貌、结构和光学特性等的影响, 并基于此薄膜制备出了日盲紫外探测器件且对该器件的紫外探测性能进行了研究.

## 2 实验过程

采用 CVD 法在蓝宝石衬底上生长不同 Cu 掺杂量的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜. 首先, 将蓝宝石衬底切割后放入超声波清洗机中分别用丙酮、乙醇和去离子水依次振荡 10 min 后将其取出, 并用氮气喷枪将蓝宝石衬底吹干. 然后, 称量一定质量比的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  粉末 (99.99%)、CuO 粉末 (99.99%) 和碳粉 (99.99%), 并将其放入研磨器中均匀混合后作为反应源, 其中载气为氩气 (Ar), 反应气体为氧气 ( $\text{O}_2$ ), 碳粉作为还原剂. 最后, 将配好的粉末平铺在刚玉舟的中间位置, 蓝宝石衬底抛光面置于刚玉舟反应源的上方, 将刚玉舟推至管式炉的中间位置. 待样品在设置好的温度和时间生长结束后, 自然冷却至室温后取出, 不同 Cu 含量  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的实验参数见表 1.

采用扫描电子显微镜 (SEM) 对不同 Cu 掺杂量的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的表面形貌进行了测试. 用 Cu 的  $K_\alpha$  辐射 (0.15418 nm) X 射线衍射 (XRD) 对不同 Cu 掺杂量的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的晶体结构进行了测试和表征. 样品的元素含量利用 X 射线能量色散谱 (EDS) 来表征. 使用紫外-可见光吸收光谱

(UV-Vis) 对样品的光学特性进行了研究. 用霍尔 (Hall) 效应测试仪对样品的导电类型和载流子浓度进行了测试.

本实验器件的制作是利用电子束蒸发法在生长完的 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜表面蒸镀 Au 作为叉指电极, 其指长、指间距和指宽分别是 1000, 20 和 20  $\mu\text{m}$ . 金属-半导体-金属结构的光电导型  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜紫外光电探测器结构示意图如图 1 所示. 利用 Keithley 4200-SCS 半导体参数测试仪和波长 254 nm 紫外光源自组装成的测试设备对其进行紫外探测性能研究.

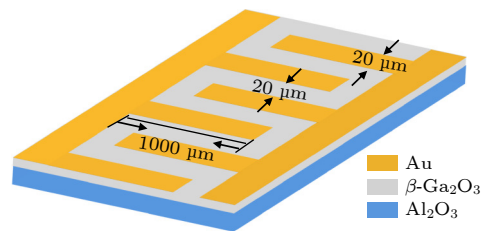


图 1 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜日盲紫外探测器结构示意图  
Fig. 1. Structural diagram of solar-blind ultraviolet detector based on Cu-doped  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  thin film.

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同 Cu 掺杂量 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的表征与分析

图 2(a)–(c) 为样品 A, B, C 的 SEM 图. 从图中可以明显看出, 样品 A, B, C 均为小晶块组成的薄膜结构, 而且样品表面都比较致密, 晶块尺寸比较均一. 通过比较还可发现, 样品 A 相较于样品 B 和 C 来说, 表面比较平滑. 另外, 还发现随着 Cu 掺杂量的增加,  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜表面粗糙度开始变差, 在薄膜表面出现了大量的凸起和小的颗粒, 在样品 C 中尤为明显. 此外, 还对样品 A, B, C 进行了 EDS 的研究, 通过测量给出样品 A, B, C 中 Cu 的摩尔百分含量分别约为 1.3%, 1.9% 和 2.4%, 结果如图 3 所示.

表 1 不同 Cu 掺杂量  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  的实验参数  
Table 1. Experimental parameters of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  with different Cu contents.

样品	$\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{CuO}$ 质量比	生长温度/ $^{\circ}\text{C}$	反应时间/min	Ar流量/( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	$\text{O}_2$ 流量/( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )
A	25:1	1000	30	200	50
B	25:2	1000	30	200	50
C	25:3	1000	30	200	50

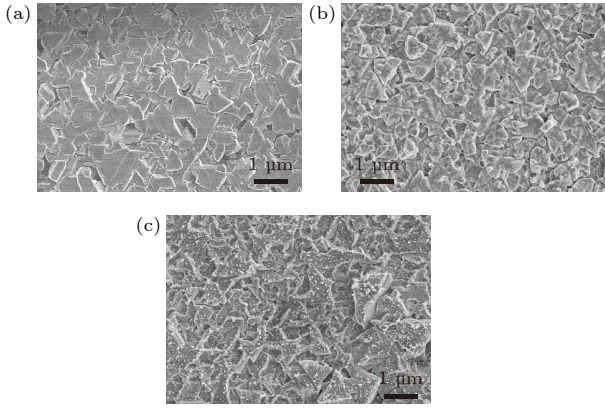


图 2 样品的 SEM 图 (a) 样品 A; (b) 样品 B; (c) 样品 C  
Fig. 2. SEM images of samples: (a) Sample A; (b) sample B; (c) sample C.

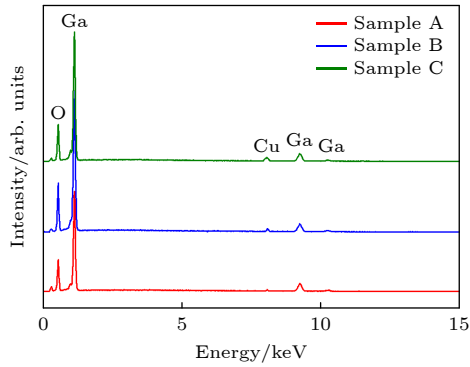


图 3 样品的 EDS 能谱图 (a) 样品 A; (b) 样品 B; (c) 样品 C  
Fig. 3. EDS spectra of samples: (a) Sample A; (b) sample B; (c) sample C.

图 4(a) 是样品 A, B, C 的 XRD 图谱. 由图可见样品 A, B, C 除了蓝宝石衬底 (006) 晶面的衍射峰以外, 在  $18.96^\circ$ ,  $38.41^\circ$  和  $59.20^\circ$  附近都呈现出 3 个明显的衍射峰, 通过与单斜结构  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  标准卡片 JCPDS 43-1012 对比后 [13], 发现它们分别对应于  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  的  $(\bar{2}01)$ ,  $(\bar{4}02)$  和  $(\bar{6}03)$  晶面的衍射峰. 此外, 对于 Cu 掺杂量稍多的样品 C 除了这 3 个衍射峰外, 在  $37.40^\circ$  还有一个很微弱的 (401) 晶面的衍射峰, 上述结果表明随着 Cu 掺杂量的增加, 薄膜的晶体质量略有降低. 另外, 也说明通过价格低廉的 CVD 法也可以制备出具有较高结晶质量的 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜. 此外还对样品 A, B, C  $(\bar{2}01)$  衍射峰进行了高斯拟合, 得到其半高宽值分别为  $0.140^\circ$ ,  $0.144^\circ$  和  $0.146^\circ$ , 由此可见随着 Cu 掺杂量的增加,  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的晶体质量有所降低, 这与上面 SEM 的结果相吻合. 图 4(b) 为样

品 A, B, C  $(\bar{2}01)$  衍射峰放大的 XRD 图, 随着 Cu 掺杂量的增加, 样品 A, B, C  $(\bar{2}01)$  衍射峰的峰位向小角度方向出现了移动, 这主要是由于杂质铜离子 ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 的半径 ( $0.073\text{ nm}$ ) 要比镓离子 ( $\text{Ga}^{3+}$ ) 的离子半径 ( $0.062\text{ nm}$ ) 大, 所以当  $\text{Cu}^{2+}$  掺入替代了  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  中  $\text{Ga}^{3+}$  的晶格位置后, 会引起晶格常数增加从而使衍射峰向小角度方向发生移动, 这也进一步说明 Cu 元素掺杂进入到了  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  晶格中.

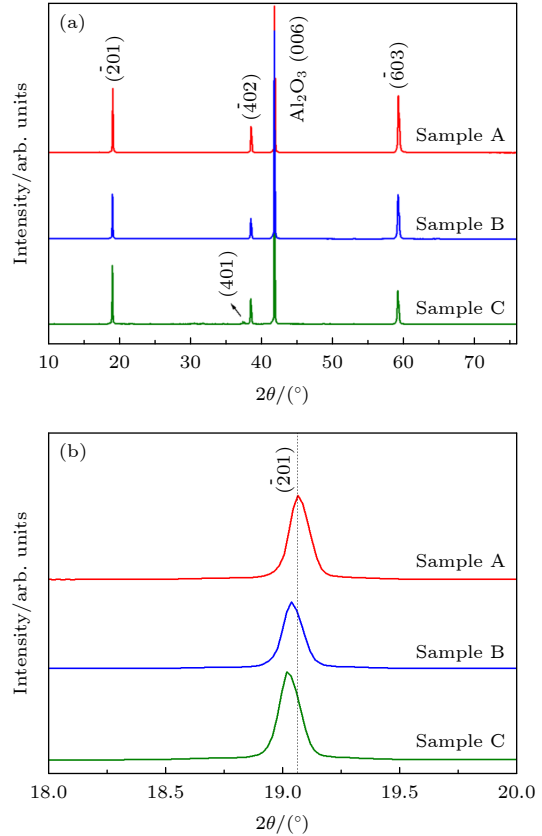


图 4 (a) 样品 A, B, C 的 XRD 图谱; (b) 样品 A, B, C 放大的  $(\bar{2}01)$  衍射峰的 XRD 图谱  
Fig. 4. (a) XRD patterns of samples A, B, C; (b) XRD patterns of amplified  $(\bar{2}01)$  diffraction peak of samples A, B, C.

对于直接带隙的半导体材料, 利用能级跃迁公式作出  $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$  曲线, 即

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

其中  $\alpha$  是吸收系数,  $h\nu$  是光子的能量,  $E_g$  是光学带隙,  $A$  是与材料相关的常数. 图 5 为样品 A, B, C 的光学吸收谱, 由图可得样品 A, B, C 的光学带隙值分别是  $4.87$ ,  $4.83$  和  $4.80\text{ eV}$ . 可以看出  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜中随着 Cu 掺杂量的增加, 吸收边出现了红移现象, 这主要是由 Cu 掺杂导致晶体质量有所下降所引起, 与 XRD 的研究结果保持一致.

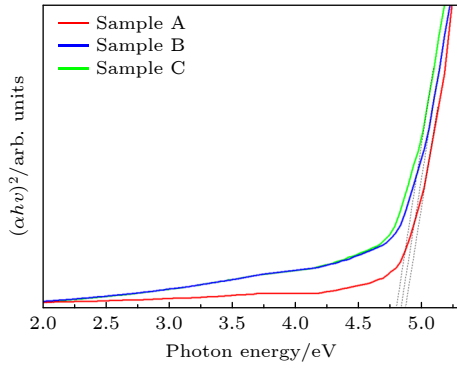


图 5 样品 A, B, C 的光学吸收图  
Fig. 5. Absorption spectra of samples A, B, C.

### 3.2 器件紫外探测性能

利用霍尔对不同 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  样品 A, B, C 的电学特性进行了测试, 测试结果见表 2. 发现样品 A, B, C 的导电类型为 p 型, 样品 A, B, C 的载流子浓度分别为  $7.36 \times 10^{14}$ ,  $4.83 \times 10^{15}$  和  $1.69 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 可见随着 Cu 掺杂量的增加, 其载流子浓度也在逐渐变大.

表 2 样品 A, B, C 的电学性质  
Table 2. Electrical properties of sample A, B, C.

样品	导电类型	载流子浓度/ $\text{cm}^{-3}$	霍尔迁移率/ $(\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1})$
A	p	$7.36 \times 10^{14}$	11.64
B	p	$4.83 \times 10^{15}$	7.38
C	p	$1.69 \times 10^{16}$	4.52

将样品 A, B, C 按照图 1 分别制作成器件 A, B, C. 图 6(a)—(c) 是器件 A, B, C 分别在黑暗环境和波长 254 nm 紫外灯照射条件下, 光功率密度为  $221 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时, 器件的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 特性曲线图, 插图为黑暗时器件  $I$ - $V$  曲线的放大图. 可见器件 A, B, C 在黑暗环境和波长 254 nm 紫外光照条件下, 电流与电压呈线性关系, 表明  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜与 Au 电极之间是良好的欧姆接触. 通过对比可以发现, 在波长 254 nm 紫外光照时器件的电流较无光照时电流明显增加. 在偏压为 10 V 时, 器件 A, B, C 的光电流值分别约为 2.01, 2.60 和  $3.07 \mu\text{A}$ , 光暗电流比分别 ( $I/I_0$ ) 约为  $2.50 \times 10^2$ ,  $3.72 \times 10^2$  和  $3.81 \times 10^2$ . 这说明器件 A, B, C 均对波长 254 nm 的紫外光具有良好的灵敏度, 且随着 Cu 掺杂浓度的增加, 器件的光电流值也在增大, 即本文中器件 C 的光电流值最大.

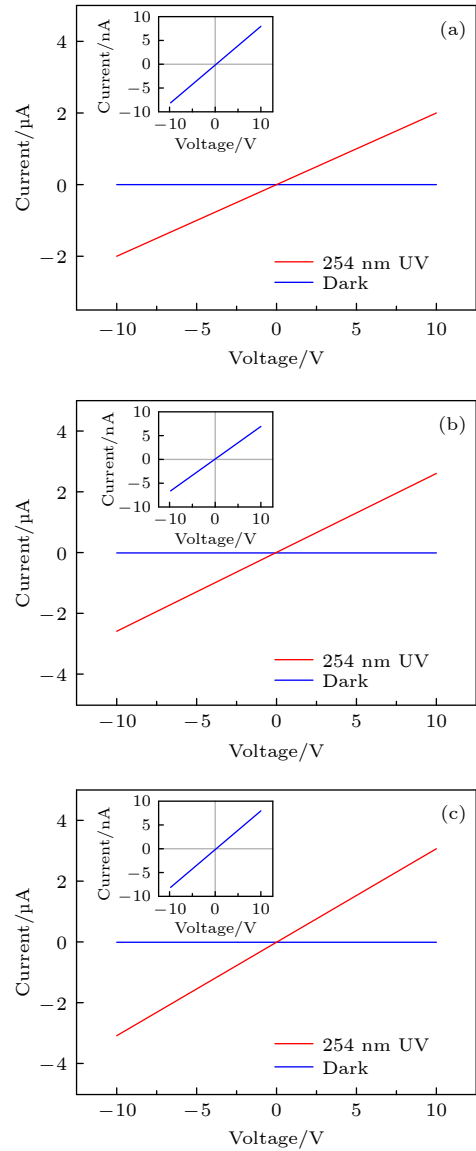


图 6 在黑暗和波长 254 nm 光照时, 器件的  $I$ - $V$  曲线 (a) 器件 A; (b) 器件 B; (c) 器件 C  
Fig. 6.  $I$ - $V$  curves of devices at dark and wave length of 254 nm illumination: (a) Device A; (b) device B; (c) device C.

图 7(a) 是器件 C 在 10 V 偏压、光功率密度分别在 64, 88, 144 和  $221 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时的响应时间曲线 (6 个周期). 可以看出器件的光电流值随着光功率密度的增加而增大, 这主要是因为器件在较高的光功率密度下可产生更多的光生电子-空穴对, 从而形成较高的光电流<sup>[14]</sup>. 此外, 从图 7(a) 也可以看出, 器件具有很好的重复性和稳定性. 响应时间是光电探测器的一个重要参数, 图 7(b) 为器件 C 在光功率密度为  $221 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 器件单个周期的响应时间曲线, 采用单 e 指数弛豫方程对响应曲线进行拟合, 即<sup>[15,16]</sup>



$$I = I_0 + Be^{-t/\tau}, \quad (2)$$

其中  $I_0$  为光电流的稳定值,  $B$  为常数,  $t$  为时间,  $\tau$  为弛豫时间. 从图 7(b) 中可以看出方程对光响应时间曲线拟合良好, 可得器件的上升时间  $\tau_r$  和下降时间  $\tau_d$  分别为 0.11 s 和 0.13 s.

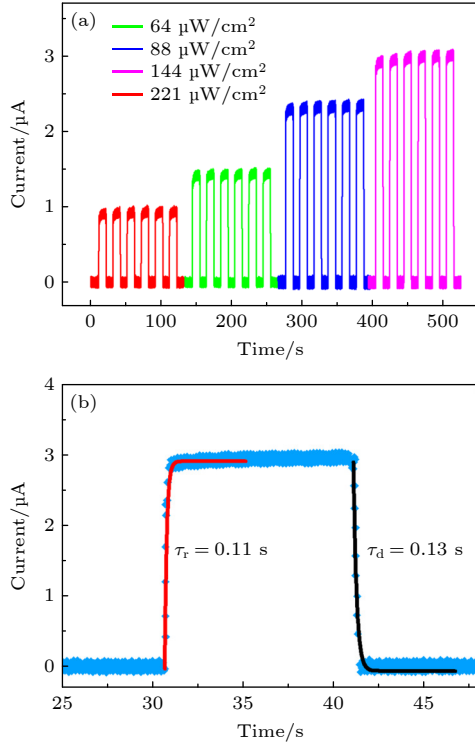


图 7 (a) 10 V 偏压下, 器件 C 对波长 254 nm 紫外光在不同光功率密度下的响应  $I$ - $t$  曲线; (b) 器件 C 单个周期的响应-恢复时间曲线

Fig. 7. (a)  $I$ - $t$  curves of responses of device C under wave length of 254 nm UV light at different light intensities at 10 V bias; (b) response-recovery time curves of a cycle for device C.

光响应度和外量子效率 (EQE) 是评价紫外光电探测器光电转换性能的 2 个重要指标. 器件 C 的响应度  $R$  和 EQE 表达式为<sup>[17-19]</sup>

$$R = \frac{I_l - I_d}{P_\lambda S}, \quad (3)$$

式中  $I_l$  表示光电流,  $I_d$  表示暗电流,  $P_\lambda$  表示光功率密度,  $S$  表示有效光照面积.

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

式中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $q$  为电子电量 ( $1.6 \times 10^{-19}$  C),  $\lambda$  为入射光波长. 图 8 为器件 C 的响应度和 EQE 随光功率密度的变化关系图. 可以看出器件 C 在光功率密度最小为  $64 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,

响应度最大为  $1.72 \text{ A}/\text{W}$ , 同时 EQE 最大为 841%. 另外, 还可以看出, 响应度和 EQE 都随着光功率密度的增大而减小, 这被认为是光照时的自热效应所引起<sup>[20]</sup>. 此外, 探测率 ( $D^*$ ) 也是光电探测器的一个关键参数, 其计算公式表示为<sup>[21]</sup>

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2qJ}}, \quad (5)$$

式中  $J$  是暗电流密度. 通过计算得出器件在  $64 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  的探测率约为  $5.65 \times 10^{12}$  Jones.

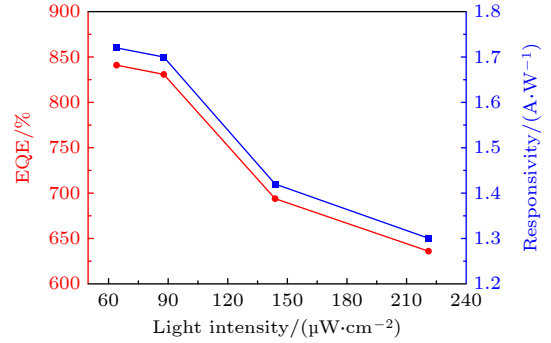


图 8 器件 C 的响应度和 EQE 随光功率密度的变化  
Fig. 8. Responsivity and EQE of device C with optical power intensity.

对于 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜基日盲紫外探测器的工作原理, 主要是器件分别在波长 254 nm 紫外光下和黑暗条件下, 光生电子-空穴对和  $\text{O}_2$  在  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜表面的吸附和解吸附过程. 在黑暗环境中, 当 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜与空气接触后, 氧气会自发的吸附在薄膜表面, 并与薄膜中的多子空穴结合形成  $\text{O}_2^+$ , 从而降低了薄膜的空穴浓度, 使  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的电导率降低. 当有波长 254 nm 紫外灯照射 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜时, 会使薄膜内产生大量的光生电子-空穴对. 当电子迁移到薄膜的表面与  $\text{O}_2^+$  结合生成  $\text{O}_2$ , 便形成了  $\text{O}_2^+$  的解吸附过程, 所以剩余的空穴会留在薄膜内, 使得薄膜内的空穴浓度明显增加, 从而导致  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的电导变大, 电阻减小. 这也就是器件在波长 254 nm 紫外灯光照下, 光电流值迅速增大的原因.

## 4 结 论

利用 CVD 法在蓝宝石衬底上, 制备出了不同 Cu 掺杂量的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜, 在薄膜上蒸镀叉指 Au 电极, 制作出光电导型日盲紫外探测器. 测试发现 Cu 掺杂  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的表面都比较平整, 且

随着 Cu 掺杂量的增加, 样品 ( $\bar{2}01$ ) 晶面的衍射峰向小角度方向发生了移动. 此外, 研究发现 Cu 摩尔百分含量为 2.4% 的器件其光暗电流比约为  $3.81 \times 10^2$ , 上升时间和下降时间分别是 0.11 s 和 0.13 s. 在光功率密度为  $64 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时, 器件的响应度和外部量子效率分别是 1.72 A/W 和 841%.

## 参考文献

- [1] Xie Z L, Zhang R, Xiu X Q, Han P, Liu B, Chen L, Yu H Q, Jiang R L, Shi Y, Zheng Y D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6717 (in Chinese) [谢自力, 张荣, 修向前, 韩平, 刘斌, 陈琳, 俞慧强, 江若琰, 施毅, 郑有焘 2007 物理学报 **56** 6717]
- [2] Zhang C X, Xu C B, Wen G J, Lian Y F 2018 *Opt. Eng.* **57** 053109
- [3] Alaie Z, Nejad S M, Yousefi M H 2014 *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **25** 852
- [4] Ouyang W, Teng F, Jiang M M, Fang X S 2017 *Small* **13** 1702177
- [5] Fan M M, Liu K W, Zhang Z Z, Li B H, Chen X, Zhao D X, Shan C X, Shen D Z 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 011117
- [6] Cicek E, McClintock R, Cho C Y, Rahnema B, Razeghi M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 191108
- [7] Pearton S J, Yang J C, IV P H C, Ren F, Kim J, Tadjer M J, Mastro M A 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 011301
- [8] Jubu P R, Yam F K 2020 *Sens. Actuators A* **312** 112141
- [9] Jin C, Park S, Kim H, Lee C 2012 *Sens. Actuators B* **161** 223
- [10] Qian Y P, Guo D Y, Chu X L, Shi H Z, Zhu W K, Wang K, Huang X K, Wang H, Wang S L, Li P G, Zhang X H, Tang W H 2017 *Mater. Lett.* **209** 558
- [11] Wang D, Ge K, Meng D, Chen Z 2023 *Mater. Lett.* **330** 133251
- [12] Zhang C, Li Z, Wang W 2021 *Materials* **14** 5161
- [13] 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, 李梦珂, 梁红伟 2018 物理学报 **67** 218101]
- [14] Feng Q J, Dong Z J, Liu W, Liang S, Yi Z Q, Yu C, Xie J Z, Song Z 2022 *Micro Nanostruct.* **167** 207255
- [15] Xu C, Shen L, Liu H, Pan X, Ye Z 2021 *J. Electron. Mater.* **50** 2043
- [16] 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
- [17] Guo X C, Hao N H, Guo D Y, Wu Z P, An Y H, Chu X L, Li L H, Li P G, Lei M, Tang W H 2016 *J. Alloy. Comp.* **660** 136
- [18] Lin R C, Zheng W, Zhang D, Zhang Z J, Liao Q X, Yang L, Huang F 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 22419
- [19] Dong L P, Pang T Q, Yu J G, Wang Y C, Zhu W G, Zheng H D, Yu J H, Jia R X, Zhe C 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 14205
- [20] Chu S Y, Yeh T H, Lee C T, Lee H Y 2022 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **142** 106471
- [21] Luo J X, Gao H L, Deng J X, Ren J H, Zhang Q, Li R D, Meng X 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 028502 (in Chinese) [落巨鑫, 高红丽, 邓金祥, 任家辉, 张庆, 李瑞东, 孟雪 2023 物理学报 **72** 028502]

# Preparation and ultraviolet detection performance of Cu doped $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films\*

Liu Wei<sup>1)</sup> Feng Qiu-Ju<sup>1)†</sup> Yi Zi-Qi<sup>1)</sup> Yu Chen<sup>1)</sup> Wang Shuo<sup>1)</sup>  
Wang Yan-Ming<sup>1)</sup> Sui Xue<sup>1)</sup> Liang Hong-Wei<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

<sup>2)</sup> (School of Microelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

( Received 12 June 2023; revised manuscript received 9 August 2023 )

## Abstract

Solar-blind UV photodetectors (SBPs) have attracted great attention because they are widely used in missile tracking, fire detection, biochemical analysis, astronomical observations, space-to-space communications, etc. At present, it is found that wide bandgap semiconductor materials such as Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, Mg<sub>1</sub>Zn<sub>1-x</sub>O, diamond and  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are ideal semiconductor materials for developing high-performance SBPs. The ultra-wide band gap semiconductor material,  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, has a large band gap width of 4.9 eV, strong breakdown electric field, absorption edge located in the solar blind ultraviolet band (200–280 nm), and it also has high transmittance in the near ultraviolet and the whole visible band. Therefore,  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is a very suitable material for making solar blind UV photodetectors. However, the p-type  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is difficult to dope, which limits the further development of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> devices. In this work, the  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films with different Cu doping content are grown on sapphire substrates by chemical vapor deposition method, and the morphology, crystal structure and optical properties of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films are measured. The test results show that the surfaces of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films with different Cu content are relatively smooth, and the (201) diffraction peak positions shift toward the lower degree side with the increase of Cu content, which indicates that Cu<sup>2+</sup> replaces Ga<sup>3+</sup> and enters into the  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lattice. The optical absorption spectrum measurement indicates that the energy gaps of samples are evidently narrowed with the increase of Cu doping concentration. Hall measurements indicate that the Cu doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films have a p-type conductivity with a hole concentration of  $7.36 \times 10^{14}$ ,  $4.83 \times 10^{15}$  and  $1.69 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , respectively. In addition, a photoconductive UV detector with metal-semiconductor-metal structure is prepared by evaporating Au on a Cu-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film, and its UV detection performance is studied. The results show that the photocurrent value of the device increases with Cu content increasing. The photo-to-dark current ratio ( $I_l/I_d$ ) is about  $3.8 \times 10^2$  of 2.4% Cu content device under 254 nm-wavelength light at 10 V. The rise time and decay time are 0.11 s and 0.13 s, respectively. Furthermore, the responsivity and external quantum efficiency can reach 1.72 A/W and 841% under 254 nm-wavelength light with a light intensity of 64  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

**Keywords:** chemical vapor deposition, p-type  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu doping, UV photodetector

**PACS:** 85.60.Gz, 81.15.Gh, 61.82.Fk

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230971

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12075045), the Natural Science Foundation of Liaoning Province, China (Grant No. 2020-MS-243), Dalian Technological Innovation Fund Project, China (Grant No. 2022JJ12GX023), and the Liaoning Normal University 2022 Outstanding Research Achievements Cultivation Fund, China (Grant No. 22GDL002).

† Corresponding author. E-mail: [qjfeng@dlut.edu.cn](mailto:qjfeng@dlut.edu.cn)

## Cu掺杂 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的制备及紫外探测性能

刘玮 冯秋菊 宜子琪 俞琛 王硕 王彦明 隋雪 梁红伟

### Preparation and ultraviolet detection performance of Cu doped $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films

Liu Wei Feng Qiu-Ju Yi Zi-Qi Yu Chen Wang Shuo Wang Yan-Ming Sui Xue Liang Hong-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 198503 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230971

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230971>

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

外电场辅助化学气相沉积方法制备网格状  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米线及其特性研究

Growth and characterization of grid-like  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanowires by electric field assisted chemical vapor deposition method

物理学报. 2018, 67(21): 218101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180805>

N掺杂对  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜日盲紫外探测器性能的影响

Effect of N-doping on performance of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film solar-blind ultraviolet detector

物理学报. 2021, 70(17): 178503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210434>

基于云母衬底生长的非晶Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 柔性透明日盲紫外光探测器研究

Flexible transparent solar blind ultraviolet photodetector based on amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown on mica substrate

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

超宽禁带半导体  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展

Ultra-wide bandgap semiconductor of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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>

引入籽晶层的物理溅射生长Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 外延薄膜特性研究

Characteristics of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial films on seed layer grown by magnetron sputtering

物理学报. 2020, 69(22): 228103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200810>

薄膜厚度对射频磁控溅射  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜光电性能的影响

Effect of film thickness on photoelectric properties of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films prepared by radio frequency magnetron sputtering

物理学报. 2022, 71(4): 048501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211744>