

文章编号 1004-924X(2024)05-0643-10

Ga 掺杂 ZnO 微米棒紫外光探测器的制备与特性

袁兆林^{1,2,3*}, 吴永炜¹, 余璐瑶¹, 何剑锋^{1,2,3}, 徐能昌¹, 汪雪元^{1,2,3}, 路鹏飞^{1,2,3}

(1. 东华理工大学 信息工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学 软件学院, 江西 南昌 330013;

3. 江西省核地学数据科学与系统工程技术研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要:为了获得高性能和低成本氧化锌(ZnO)基紫外光探测器,使用Ga掺杂ZnO(ZnO:Ga)作为光敏层,采用水热法合成了不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒,Ga与Zn的原子比分别为0%(未掺杂),0.5%,1%,2%和4%。使用X射线衍射仪(XRD)测试所有样品的晶体结构,发现它们都为六方纤锌矿结构的ZnO。采用扫描电子显微镜(SEM)观察它们的形貌,都呈现棒状结构。进一步,制备叉指图案氟掺杂的氧化锡(FTO)导电玻璃基底,将不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒分别涂覆在FTO上,得到5种简单结构的紫外光探测器,系统研究了它们的性能。结果表明:所有ZnO:Ga微米棒紫外光探测器对365 nm紫外光表现出良好的响应。其中,1% Ga掺杂ZnO:Ga微米棒紫外光探测器性能最佳,经计算,在365 nm波长处,它的响应度、增益和比探测率分别为13.13 A/W (5 V),44.63 (5 V), 3.31×10^{12} Jones,响应时间和衰减时间分别为12.3 s和36.4 s。说明在ZnO微米棒中进行合适Ga掺杂能有效提高紫外光探测器的性能。该研究有助于基于ZnO:Ga材料的紫外光探测器及相关器件发展。

关键词:紫外光探测器;镓掺杂氧化锌;微米棒;水热法;响应度

中图分类号:TN361 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243205.0643

Fabrications and characteristics of Ga-doped ZnO microrods ultraviolet photodetectors

YUAN Zhaolin^{1,2,3*}, WU Yongwei¹, YU Luyao¹, HE Jianfeng^{1,2,3}, XU Nengchang¹,

WANG Xueyuan^{1,2,3}, LU Pengfei^{1,2,3}

(1. School of Information Engineering, East China University of Technology,
Nanchang 330013, China;

2. School of Software, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

3. Jiangxi Engineering Technology Research Center of Nuclear Geoscience Data Science and System,
Nanchang 330013, China)

* Corresponding author, E-mail: yzlyx98@sina.com

Abstract: To achieve high-performance, low-cost zinc oxide (ZnO)-based ultraviolet photodetectors, uti-

收稿日期:2023-08-02;修订日期:2023-10-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11865002);江西省自然科学基金资助项目(No. 20212BAB201003);江西省核地学数据科学与系统工程技术研究中心开放基金资助项目(No. JETRCNGDSS202209);东华理工大学博士科研启动基金资助项目(No. DHBK2019214);江西省研究生创新研究基金资助项目(No. YC2021-S624, No. YC2023-S591)

lizing Ga-doped ZnO (ZnO:Ga) as the photosensitive layer is key. This study synthesized ZnO:Ga microrods with varying Ga doping concentrations (0% [undoped ZnO], 0.5%, 1%, 2%, and 4%) using a straightforward hydrothermal method. The atomic ratios of Ga to Zn were meticulously adjusted. Initial analyses revealed that all samples possessed the hexagonal wurtzite ZnO structure, as confirmed by X-ray diffractometry (XRD). Scanning electron microscopy (SEM) showed that the microrods maintained a consistent rod-like morphology. Subsequently, these microrods were applied to fluorine-doped tin oxide (FTO) glass substrates with interdigital patterns to construct five ultraviolet photodetectors. Their performance was thoroughly evaluated, demonstrating that all devices efficiently responded to 365 nm light. Notably, the photodetector with 1% Ga-doped ZnO microrods achieved superior performance, delivering a responsivity of 13.13 A/W, a gain of 44.63, and a specific detectivity of 3.31×10^{12} Jones at 365 nm. Its response and decay times were recorded at 12.3 s and 36.4 s, respectively. These findings suggest that an optimal Ga concentration can significantly enhance the performance of ZnO-based ultraviolet photodetectors. This research contributes valuable insights for the development of advanced ultraviolet photodetectors and related devices utilizing ZnO:Ga materials.

Key words: ultraviolet photodetector; Ga-doped ZnO; microrods; hydrothermal method; responsivity

1 引 言

紫外光(Ultraviolet, UV)探测器是一种非常重要的光电子器件,已广泛应用在医疗、火灾预防、光通信和航天航空等领域^[1-3]。目前,半导体紫外光探测器主要采用氧化镓、氮化镓和氧化锌(ZnO)^[4-9]等作为光敏材料。其中,ZnO具有较高的激子束缚能(60 meV)、直接宽禁带(3.37 eV)、优良的光电特性,且原料丰富,价格低廉和无毒性,被认为是最适合用于制备紫外光探测器的材料之一^[10]。

本征 ZnO 为 n 型半导体,它对紫外光有很强的吸收,但电学性能不佳。大量研究表明,在 ZnO 中掺杂一种或多种金属元素,如 In, Al, Ag, Ga 等^[11-16],可以有效改善其电学性能。在这些掺杂元素中,Ga 被认为是最理想的元素之一,因为 Ga^{3+} 的离子半径(0.062 nm)小于 Zn^{2+} 的离子半径(0.074 nm),理论上 Ga^{3+} 可以进入 ZnO 晶格,取代 Zn^{2+} 并占据它的位置,产生更多自由电子,从而显著提高 ZnO 的电学性能。Atiq 等^[17]采用脉冲激光沉积法制备出 ZnO:Ga 薄膜,并研究了它的光致发光和结构特性。Ali 等^[18]利用溶胶-凝胶法制备了 ZnO:Ga 薄膜,研究了 Ga 掺杂对 ZnO 薄膜形貌、结构和光学特性的影响。Ghafry 等^[19]

采用微波辅助方法,在玻璃衬底上合成了几种 Ga 掺杂浓度 ZnO:Ga 纳米棒,并系统研究了它们对亚甲基蓝的光催化特性。

近年来,一维 ZnO 微米(纳米)棒由于具有独特的几何结构、较大的比表面积和易制备等特点,引起人们极大的研究兴趣。迄今为止,化学气相沉积^[20]、单化学法^[21]和水热法^[22]等都可以制备出 ZnO 微米(纳米)棒。在这些方法中,水热法具有实验条件温和、操作简便,制备出的材料结晶质量好等优点。因此,人们开展了一些关于水热法制备 ZnO:Ga 微米(纳米)棒的研究^[23-25]。

Kumar 等^[26]研究了 ZnO:Ga 薄膜紫外光探测器,当 Ga 掺杂浓度为 3% 时,器件的响应度、外量子效率和比探测率分别为 0.38 A/W, 125.10%, 1.24×10^{10} Jones。Yang 等^[27]利用磁控溅射法制备了 ZnO:Ga 薄膜紫外光探测器,掺杂 2% Ga 时,它的响应度、比探测率、响应和恢复时间分别为 9.993 mA/W, 1.773×10^{11} Jones, 15.3 ms 和 188 ms。Young 研究组^[28-30]使用水热法在玻璃基片制备出 ZnO:Ga 纳米棒阵列紫外光探测器,发现探测器在 1 V 偏压下,光电流与暗电流比为 15.2,响应和恢复时间分别为 29.75 s 和 89.67 s。他们还在柔性衬底上制备了几种 ZnO:Ga 纳米棒阵列紫外光探测器^[31],器件的最佳性能如下:在 1 V

偏压下响应度为0.046 A/W,响应和恢复时间分别为89 s和106 s。Chu等^[32]研究了纯ZnO和ZnO:Ga纳米片紫外光探测器性能,发现Ga掺杂可以有效提高器件性能,掺杂后,在3 V偏压下,器件的响应和恢复时间分别为34 s和43 s。尽管水热法制备的ZnO:Ga纳米(微米)结构紫外光探测器研究取得了很大进展,但这类器件的性能仍亟待提高。另外,系统研究不同Ga掺杂浓度的ZnO:Ga微米(纳米)棒紫外光探测器甚少。

本文首先采用水热法合成不同Ga掺杂浓度的ZnO:Ga微米棒,研究了它们的形貌和结构,并以ZnO:Ga微米棒作为光敏层,制备出一系列ZnO:Ga微米棒紫外光探测器,详细研究了器件性能,分析了Ga掺杂浓度对器件性能的影响。

2 实验

2.1 ZnO:Ga微米棒制备

采用水热法制备不同Ga掺杂浓度的ZnO:Ga微米棒。首先,称取2.231 3 g六水合硝酸锌和1.051 5 g六次甲基四胺,分别放入两个烧杯中,加入去离子水,磁力搅拌20 min,完全溶解。为了制备ZnO:Ga微米棒,称取适量的硝酸镓,Ga与Zn原子比分别为0%(未掺杂),0.5%,1%,2%和4%,加入硝酸锌水溶液中,继续搅拌20 min,然后将两溶液混合,再搅拌1 h。最后,将混合溶液转移进入100 mL水热反应釜中,密封,将水热反应釜置入烘箱中,在170 ℃反应5 h。反应结束后,收集到大量白色沉淀,用无水乙醇和去离子水反复清洗3~5次,然后将样品置于真空烘箱中,60 ℃下烘干,得到白色粉末。

2.2 ZnO:Ga微米棒紫外光探测器的制备

FTO导电玻璃用作基底,将它切成2 cm × 2 cm大小,用激光刻蚀成叉指图案,叉指对数为5,叉指指宽和间距都为500 μm。然后,分别在洗涤剂、去离子水、丙酮和异丙醇中超声清洗15 min,烘干备用。分别称取一定质量不同Ga掺杂浓度的ZnO:Ga微米棒粉末,分散在异丙醇中,用研钵研磨成胶体溶液,浓度为20 mg/mL。取少量胶体溶液旋涂在干净的叉指图案FTO导电玻璃上,转速为2 000 r/min,时间为40 s,随后放入马弗炉中,450 ℃下空气中退火1 h,形成5种ZnO:Ga微米棒紫外光探测器,器件如图1所示。

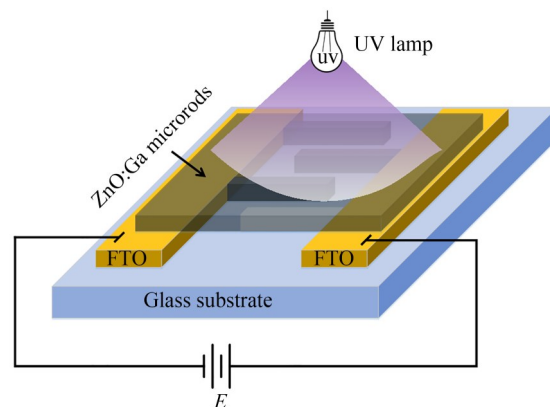


图1 ZnO:Ga微米棒紫外光探测器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ZnO:Ga microrods UV photodetector

2.3 材料与器件表征

采用 Philips X'pert Pro MPD 型 X 射线衍射仪(XRD)研究材料的晶体结构,扫描角度为20°~70°;通过 JEOL 7610Plus 型扫描电子显微镜(SEM)和 JEM-2100F 型透射电子显微镜(TEM)观察材料的形貌;材料能量色散 X 射线谱(EDS)和选区电子衍射(SAED)分别使用 SEM 和 TEM 配置的设备进行测试;利用 Keithley 2400 半导体特性测试仪测量紫外光探测器在暗态和紫外光照射下的电流-电压(I - V)和电流-时间(I - t)特性,使用波长为365 nm的12 W紫外光灯作为光源,其辐照度使用 UVA365 辐照计进行标定。

3 分析与讨论

首先对不同Ga掺杂浓度的ZnO:Ga微米棒的晶相结构进行测试分析,它们的XRD图谱如图2所示。可以看出,所有样品都出现9个明显的衍射峰,分别为ZnO的(100),(002),(101),(102),(110),(103),(200),(112)和(201)峰,对所有衍射峰进行比对,结果与六方纤锌矿结构ZnO的标准谱图(JCPDS 36-1451)相吻合。没有发现相关杂质或化合物的衍射峰,说明所有样品均为六方纤锌矿结构ZnO。另外,XRD图谱中也未发现Ga相关的杂质或化合物的衍射峰。表1列出了不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒(100),(002)和(101)3个主要衍射的 2θ 角位置。可以看出,Ga掺杂后,所有样品的衍射峰位置未发生明显改变,说明 Ga^{3+} 可能进入ZnO晶格内部,主

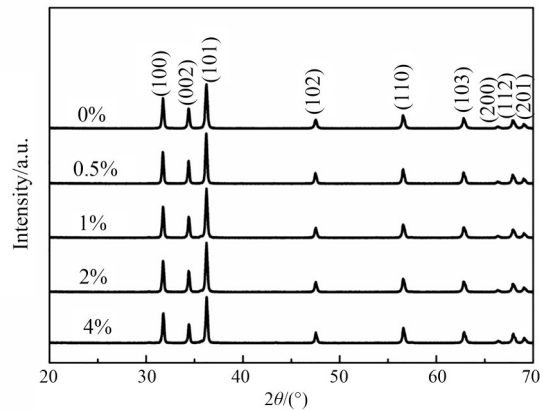


图2 不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of ZnO:Ga microrods with different Ga doping concentrations

要以替代晶格中 Zn^{2+} 的位置形式存在^[32]。而且所有衍射峰都比较尖锐,表明样品具有较好的结晶质量。

不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒的SEM形貌如图3所示。可以观察到,所有样品中都出现大量的棒状结构ZnO。随着Ga掺杂浓度的增大,ZnO:Ga微米棒结构未发生明显改变。特别

表1 不同Ga掺杂ZnO:Ga微米棒的主要衍射峰 2θ 角位置

Tab. 1 Position of 2θ angle of main diffraction peaks for ZnO:Ga microrods with different Ga doping concentrations

Ga 掺杂 浓度 / %	$2\theta / (^{\circ})$		
	(100)	(002)	(101)
0	31.74	34.40	36.24
0.5	31.72	34.40	36.22
1	31.76	34.42	36.26
2	31.74	34.42	36.24
4	31.76	34.42	36.24

是Ga掺杂浓度为1%的样品,大量的微米棒清晰可见,大部分微米棒的直径在数百纳米,长度在几微米。为了进一步证实Ga掺杂进入ZnO微米棒中,检测了1%Ga掺杂ZnO:Ga微米棒样品的EDS图谱,如图3(f)所示。从图谱中发现,样品中出现了明显的Zn,O,Ga元素的谱峰,

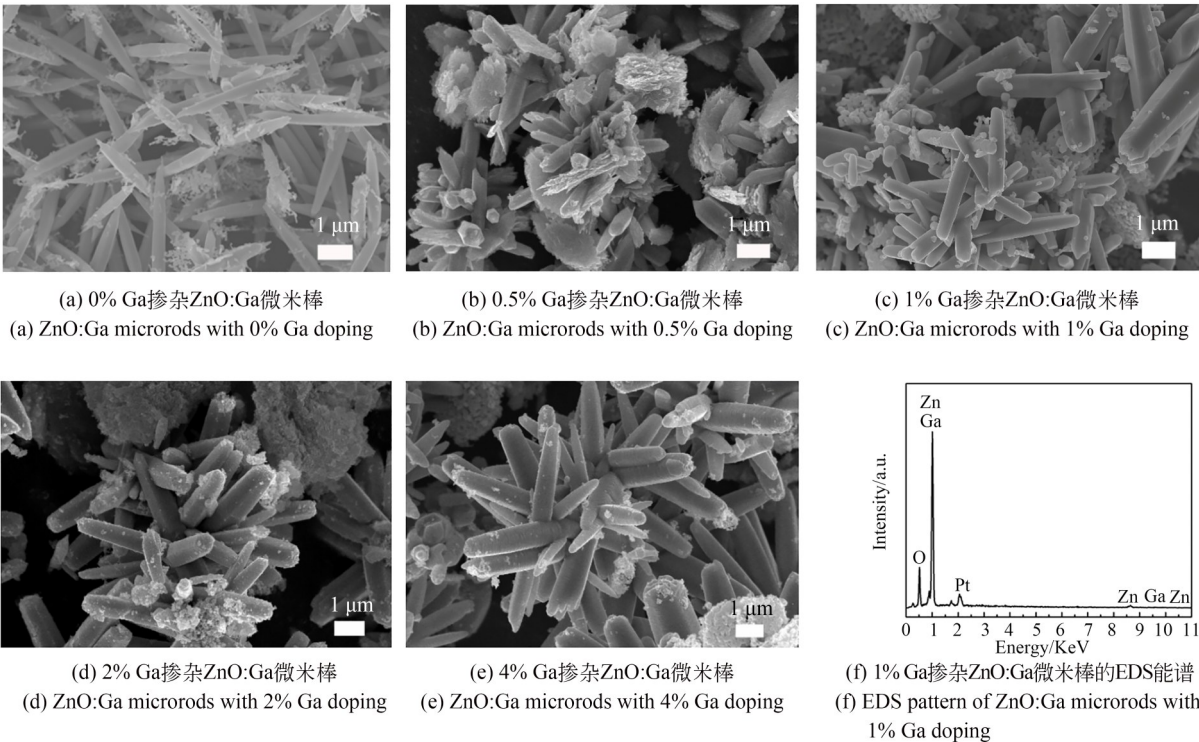
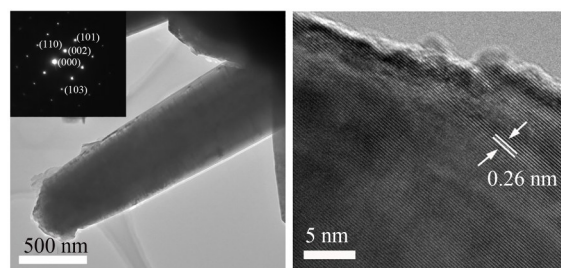


图3 不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒的SEM图和1%Ga掺杂ZnO:Ga微米棒的EDS能谱
Fig. 3 SEM images of ZnO:Ga microrods with different Ga doping concentrations and EDS pattern of ZnO:Ga microrods with 1% Ga doping

证实微米棒是由Zn, O, Ga元素组成的, 结合XRD分析结果, 可以进一步证明Ga掺杂进入ZnO微米棒中。图中还出现Pt峰, 这是为了提高样品的导电性能, 测试前在其表面溅射了Pt薄层。

为了进一步深入研究ZnO:Ga微米棒的形貌, 检测了1%Ga掺杂ZnO:Ga微米棒的TEM形貌, 结果如图4所示。图4(a)为样品的低分辨率TEM形貌。清晰观察到单根微米棒, 表面光滑, 顶端直径约为450 nm, 这与SEM结果相吻合。插图为该样品选区的电子衍射(SAED)图, 图中出现一些排列规则的明亮斑点, 说明该微米棒为单晶, 具有六方纤锌矿结构, 与XRD结果相一致。图4(b)为该样品的高分辨TEM(HR-TEM)形貌。微米棒具有清晰整齐排列的晶格条纹。经计算, 两相邻晶格条纹的间距约为0.26 nm, 对应的是ZnO:Ga微米棒晶格中两相邻(002)面之间的距离^[33]。

为了评价不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒紫外光探测器的性能, 首先测试它们在暗态和波长为365 nm, 辐照度为71 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外光照射下的 I - V 特性, 偏压为 $-5\sim 5$ V, 结果如图5所示。图5(a)是所有器件在暗态下的 I - V 特性曲线, 发现它们在所有偏压下的暗态电流都比较小。相比其他Ga掺杂浓度的ZnO:Ga微米棒器



(a) 低分辨TEM图(插图:SAED图) (b) 高分辨TEM图
(a) Low-resolution TEM image (Inset: SAED pattern) (b) High-resolution TEM image

图4 1% Ga掺杂ZnO:Ga微米棒的TEM图

Fig. 4 TEM images of ZnO:Ga microrods with 1% Ga doping

件, 1% Ga掺杂的ZnO:Ga微米棒紫外光探测器的暗电流有所增大, 这主要是由于该器件的电阻率较小。当器件处于紫外光照射下, 它们的 I - V 特性曲线如图5(b)所示。通过比较可以发现, 它们在光照下的电流比相应偏压下的暗电流增大了许多, 这说明所有器件对365 nm紫外光有较好的响应和光电转换能力。特别是1% Ga掺杂的ZnO:Ga微米棒紫外光探测器, 增幅最大, 在偏压为5 V时, 该器件从暗态电流3.66 μA 增大到光照电流109.21 μA 。

为了定量评价所有紫外光探测器的性能, 它们的响应度(R_λ)、增益(G)和比探测率(D^*)分

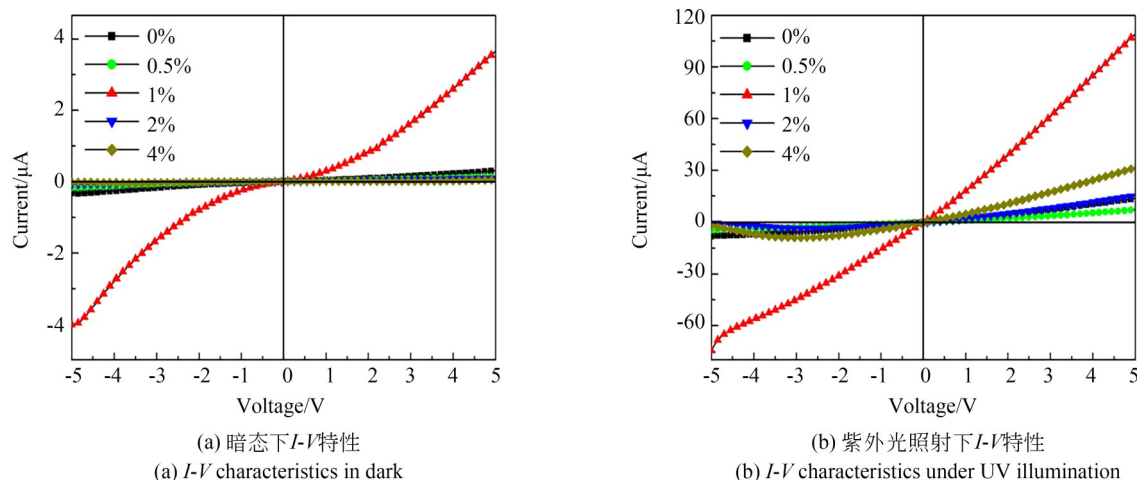


图5 不同Ga掺杂浓度ZnO:Ga微米棒紫外光探测器暗态和紫外光照射下的 I - V 特性

Fig. 5 I - V characteristics of ZnO:Ga microrods UV photodetectors with different Ga doping concentrations in dark and under UV illumination

别为^[33-37]:

$$R_{\lambda}=\frac{I_{UV}-I_D}{PA}, \tag{1}$$

$$G=\frac{I_{UV}-I_D}{q\eta/h\nu}, \tag{2}$$

$$D^*=\frac{R_{\lambda}\sqrt{A}}{\sqrt{2qI_D}}, \tag{3}$$

式中: I_{UV} 、 I_D 、 P 、 A 、 q 、 η 和 ν 分别为探测器在紫外光照射下的电流、暗电流、辐照度、器件有效面积、电子电荷、量子效率、普朗克常数和入射光子频率。 P 经标定为 $71\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$,所有器件的有效面积 A 均为 0.36 cm^2 。采用在 5 V 处的暗电流和光照电流,计算得到所有紫外光探测器的 R_{λ} 、 G 和 D^* 值,如表2所示。

表 2 不同 Ga 掺杂 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of ZnO:Ga microrods UV photodetectors with different Ga doping concentrations

Ga 掺杂 浓度/%	光电流(5 V) / μA	响应度(5 V) / $(\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	增益 (5 V)	比探测率 (5 V)/Jones	响应时间/s	衰减时间/s
0	13.56	0.53	1.80	2.94×10^{11}	52.9	60.7
0.5	7.18	0.28	0.95	7.84×10^{11}	42.1	48.4
1	105.55	13.13	44.63	3.31×10^{12}	12.3	36.4
2	15.18	0.59	2.01	2.07×10^{12}	41.0	42.9
4	31.55	1.23	4.19	5.92×10^{12}	51.6	84.4

响应速度是紫外光探测器另一个关键性能参数。图6是在 5 V 偏压下,周期开启和关闭辐照度为 $71\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 365 nm 紫外光时,所有探测器的 I - t 特性。可以看出,当紫外光开启时,所有紫外光探测器的电流迅速增大,然后趋于稳定;关闭紫外光时,器件电流快速下降,衰减至起始值。由此表明,所有探测器对 365 nm 紫外光具有稳定、快速和可重复的响应。值得注意的是,

当紫外光开启时, 1% Ga掺杂的器件具有最大光电流。在初始测试周期出现了脉冲现象,经过几个周期后逐渐稳定,而 4% Ga掺杂器件的光电流稍大于 2% Ga掺杂器件,这可能是 2% Ga掺杂器件未达到最优,相关的器件优化工作仍在进行中。

为了准确比较所有紫外光探测器的响应与衰减时间,将器件的响应时间(τ_r)定义为从器件电流峰值 10% 上升到 90% 所需要的时间,衰减时间(τ_d)为电流峰值的 90% 下降至 10% 所需的时间^[36]。在所有器件的 I - t 特性中分别选取一个典型的响应-衰减周期,如图7所示。从图中可以估算出所有紫外光探测器的响应时间和衰减时间,结果如表2所示。

由表2可以发现,在所有器件中, 1% Ga掺杂 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器性能最佳,说明对于 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器,Ga的最佳掺杂浓度为 1% 。这主要是由于 1% Ga掺杂的 ZnO:Ga 微米棒具有良好的结晶性和最理想的光电特性,一方面,从 XRD 和 TEM 可以看出,当 Ga 掺杂浓度为 1% 时,ZnO:Ga 微米棒形貌规整、表面光滑,具有良好的结晶性;另一方面,在 ZnO 微米棒中适度掺杂 Ga,可以有效增加其自由电子浓度和迁移率,减小它的电阻率,从而改善微米棒

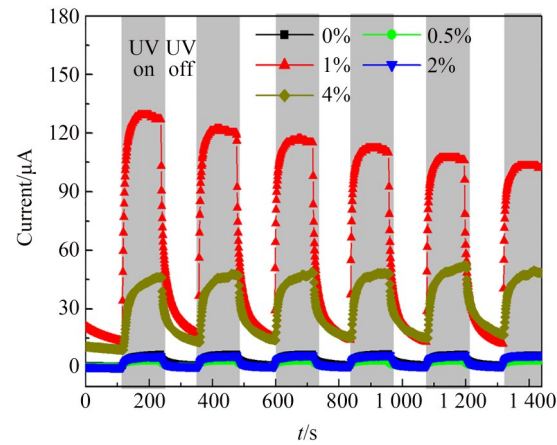


图 6 周期开启和关闭紫外光时不同 Ga 掺杂浓度 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器的 I - t 特性

Fig. 6 I - t characteristics of ZnO:Ga microrods UV photodetectors with different Ga doping concentrations by turning on and off UV light periodically

的电学性能。对 ZnO 微米棒进行过量 Ga 浓度掺杂 ($>1\%$), 电子浓度达到过饱和, 迁移率减小, 电阻率反而增大, 导致微米棒的电学性能下降。过量的 Ga 浓度掺杂 ZnO:Ga 微米棒应用于紫外光探测器时, ZnO 晶格中出现大量 Ga 离子会对入射光子产生大量散射, 从而也会降低紫外光探

测器性能^[37]。

将 1%Ga 掺杂 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器的主要性能参数与最近报道的几种金属掺杂 ZnO 紫外光探测器进行比较, 结果如表 3 所示。可以看出, 1%Ga 掺杂 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器的主要性能最优。

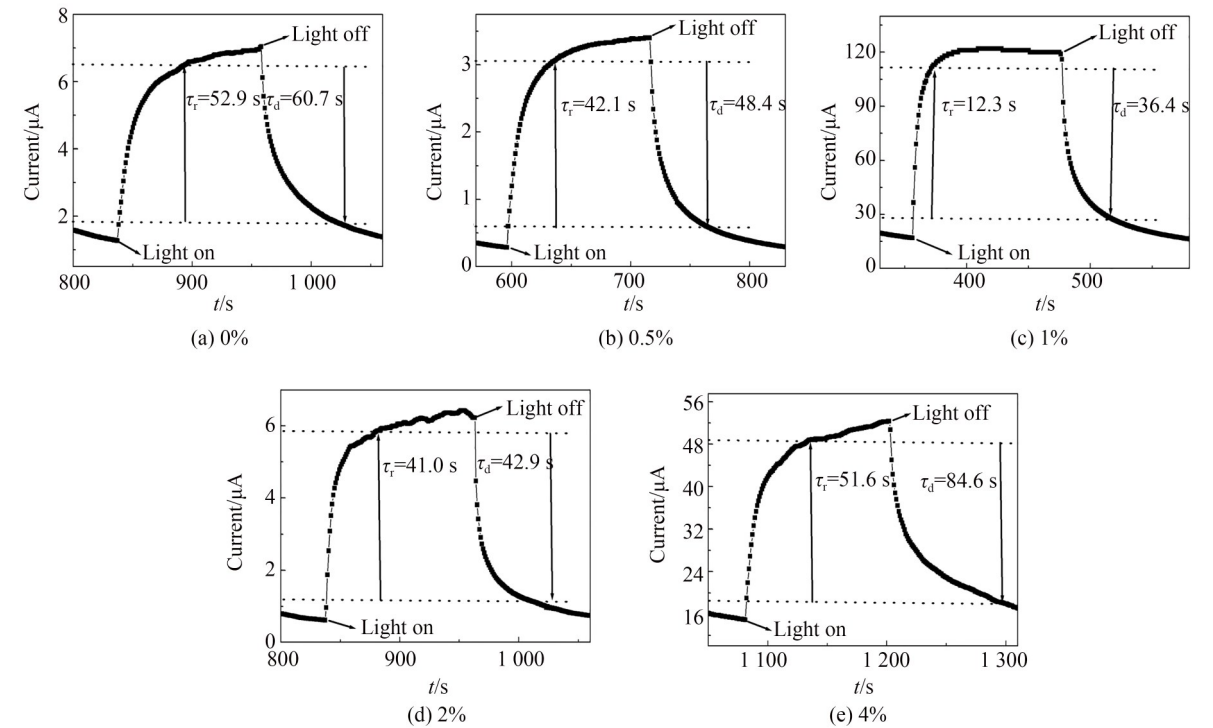


图 7 不同 Ga 掺杂浓度 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器的一个典型响应-衰减周期

Fig. 7 One typical response-decay period of ZnO:Ga microrods UV photodetectors with different Ga doping concentrations

表 3 1%Ga 掺杂 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器与最近报道的几种金属掺杂 ZnO 紫外光探测器的主要性能参数比较

Tab. 3 Comparison of main performance parameters among 1% Ga-doped ZnO:Ga microrods UV photodetector and several metal-doped ZnO UV photodetectors reported in recent works

光敏材料	响应度/(A·W ⁻¹)	比探测率/Jones	响应时间/s	衰减时间/s
ZnO:Al films ^[38]	5.63	1.8×10 ¹²	30	36
ZnO:Fe films ^[39]	0.196	4.95×10 ¹⁰	—	—
ZnO:Ga nanosheets ^[32]	0.87	—	34	43
ZnO:Ga nanorods ^[28]	—	—	29.75	89.67
ZnO:Ga microrods	13.13	3.31×10 ¹²	12.3	36.4

4 结 论

本文采用水热法成功制备了不同 Ga 掺杂浓度的 ZnO:Ga 微米棒, 研究了它们的形貌和晶体结

构。进一步, 以不同 Ga 掺杂浓度 ZnO:Ga 微米棒作为光敏层, 制备出一系列紫外光探测器。实验结果表明, 所有 Ga 掺杂浓度的 ZnO:Ga 微米棒紫外光探测器对 365 nm 紫外光都表现出良好的响应。

Ga 掺杂浓度对其紫外光探测器性能具有重要影响,当 Ga 掺杂浓度为 1% 时,其紫外光探测器性能

最佳。这一研究对于 ZnO:Ga 材料制备及其在相关光电子器件中应用具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] CHEN K, WANG X F, ZOU C, *et al.* Two-in-one: End-emitting blue LED and self-powered UV photodetector based on single trapezoidal PIN GaN microwire for ambient light UV monitoring and feedback[J]. *Small Methods*, 2023, 7(6): 2300138.
- [2] SOSNA-GLEBSKA A, SIBINSKI M, SZCZECINSKA N, *et al.* UV-Visible silicon detectors with zinc oxide nanoparticles acting as wavelength shifters[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 20: 25-29.
- [3] XU X, CHEN J X, CAI S, *et al.* A real-time Wearable UV-radiation monitor based on a high-performance p-CuZnS/n-TiO₂ photodetector [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(43): 1803165.
- [4] WEI J Y, SHEN L P, ZHENG Z C, *et al.* The suppression of dark current for achieving high-performance Ga₂O₃ nanorod array ultraviolet photodetector [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(9): 12112-12117.
- [5] DALAPATI P, EGAWA T, MIYOSHI M. Current-driven degradation dynamics in GaN/InGaN multi-quantum-wells UV photodetectors fabricated with a high-quality Al₂O₃ passivation film[J]. *Vacuum*, 2023, 213: 112159.
- [6] 朱建华,容萍,任帅,等. ZnO 纳米棒/Bi₂S₃量子点异质结的制备及光电探测性能研究[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(16): 1915-1923.
ZHU J H, RONG P, REN SH, *et al.* Preparation and photodetection performance of ZnO nanorods/Bi₂S₃ quantum dots heterojunction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(16): 1915-1923. (in Chinese)
- [7] HAN Y R, WANG X F, FU S H, *et al.* Ultrahigh detectivity broad spectrum UV photodetector with rapid response speed based on p-β Ga₂O₃/n-GaN heterojunction fabricated by a reversed substitution doping method[J]. *Small*, 2023, 19(16): 2206664.
- [8] WU H S, ZHANG T, SHEN L Y, *et al.* Interfacial engineering of SnS/Ga₂O₃ heterojunction by SnO for a high-performance self-powered solar-blind UV photodetector [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9(24): 2200851.
- [9] 胡韩飞,徐英添,李莉,等. 基于溶胶凝胶法制备的 CuCr_{1-x}Mg_xO₂/ZnO 纳米棒紫外光电探测器[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1423001.
- [10] HU H F, XU Y T, LI L, *et al.* A CuCr_{1-x}Mg_xO₂/ZnO nanorods UV photodetector prepared by Sol-gel method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1423001. (in Chinese)
- [11] NING Y, ZHANG Z, TENG F, *et al.* Novel transparent and self-powered UV photodetector based on crossed ZnO nanofiber array homojunction [J]. *Small*, 2018, 14(13): 1703754.
- [12] SHKIR M. Development of highly sensitive Al, Ga, and In-doped ZnO films by the drop casting method for NH₃ gas sensing [J]. *New Journal of Chemistry*, 2023, 47(10): 4880-4887.
- [13] KUMAR A G, LI X, DU Y, *et al.* UV-Photodetector based on heterostructured ZnO/(Ga,Ag)-co-doped ZnO nanorods by cost-effective two-step process [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 509: 144770.
- [14] XU M, YUAN Z L, WANG B Y, *et al.* Hydrothermal synthesis of single-crystalline Ag-doped ZnO nanoneedles for ultraviolet detection[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(9): 7020-7027.
- [15] MANOHARAN R, MANJCEEVAN A, VELAUTHAMURTY K, *et al.* Conversion of both photon and mechanical energy into chemical energy using higher concentration of Al doped ZnO [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 948: 169712.
- [16] PHAM A T T, HOANG D V, NGUYEN T H, *et al.* Hydrogen enhancing Ga doping efficiency and electron mobility in high-performance transparent conducting Ga-doped ZnO films[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 860: 158518.
- [17] CHINNASMY M, BALASUBRAMANIAN K. Investigation on laser induced fano resonance of hydrothermally synthesized Ag doped ZnO hierarchical nanoporous structure and its UV photodetector properties [J]. *Optical Materials*, 2022, 133: 112873.
- [18] ATIQ S, ANSAR M T, HASSAN A, *et al.* Interlayer effect on photoluminescence enhancement

- and band gap modulation in Ga-doped ZnO thin films[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2020, 144: 106576.
- [18] ALI H E, GANESH V, HARRTHA L, *et al.* Kramers-Kronig analysis of the optical linearity and nonlinearity of nanostructured Ga-doped ZnO thin films [J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 135: 106691.
- [19] GHAFRY S S AAL, AL-ABRI M Z, FARSI B A, *et al.* Ga-doped ZnO nanorods: The photocatalytic performance of methylene blue under solar irradiation[J]. *Optical Materials*, 2022, 126: 11213.
- [20] ZHANG M, ZHOU T, LI H, *et al.* UV-durable superhydrophobic ZnO/SiO₂ nanorod arrays on an aluminum substrate using catalyst-free chemical vapor deposition and their corrosion performance[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 623: 157085.
- [21] SHINDE S R, SHINDE V P. Liquefied petroleum gas sensing performance of solchemically synthesized ZnO nanorods: Role of precursors and fractal analysis [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 345: 113800.
- [22] DENG H, FANG B, ZHANG Q, *et al.* Porosity engineering of ZnO nanorods for efficient sensing of n-butanol vapor[J]. *Materials Letters*, 2022, 328: 133169.
- [23] MICOVA J, REMES Z, ARTEMENKO A, *et al.* Plasma treatment of Ga-doped ZnO nanorods [J]. *Physica Status Solidi A*, 2022, 219 (10): 2100663.
- [24] PHAN D T, CHUNG G S. Effects of defects in Ga-doped ZnO nanorods formed by a hydrothermal method on CO sensing properties[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 187: 191-197.
- [25] SINGH P, SIMANJUNTAK F M, KUMAR A, *et al.* Resistive switching behavior of Ga doped ZnO-nanorods film conductive bridge random access memory[J]. *Thin Solid Films*, 2018, 660: 828-833.
- [26] KUMAR K D A, MELE P, MURAHARI P, *et al.* Enhancement of performance of Ga incorporated ZnO UV photodetectors prepared by simplified two step chemical solution process [J]. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2022, 333: 113217.
- [27] YANG M L, WENG X L, IQBAL M A, *et al.* Broadband photoresponse in plasmon-enhanced Ga-doped ZnO[J]. *Materials Advances*, 2023, 4(9): 2226-2233.
- [28] HSIAO C H, HUANG C S, YOUNG S J, *et al.* Field-emission and photoelectrical characteristics of Ga-ZnO nanorods photodetector[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(6): 1905-1910.
- [29] YOUNG S J, CHIOU C L. Synthesis and optoelectronic properties of Ga-doped ZnO nanorods by hydrothermal method [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(11): 103-107.
- [30] YOUNG S J, CHIOU C L, LIU Y H, *et al.* Synthesis of Ga-doped ZnO nanorods by hydrothermal method and their application to ultraviolet photodetector[J]. *Inventions*, 2016, 1(1): 3.
- [31] YOUNG S J, LIU Y H, SHIBLEE M D N I, *et al.* Flexible ultraviolet photodetectors based on one-dimensional gallium-doped zinc oxide nanostructures[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(11): 3522-3529.
- [32] CHU Y L, YOUNG S J, CHU T T, *et al.* Improvement of the UV-sensing performance of Ga-doped ZnO nanostructures via a wet chemical solution at room temperature[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2021, 10(12): 127001.
- [33] WU H, YUAN Z L, WANG B Y, *et al.* Synthesis of single-crystalline ZnO nanoflowers for a superhigh-sensitivity ultraviolet photodetector application[J]. *Optical Materials*, 2021, 122: 111683.
- [34] LUO P, WANG F, QU J, *et al.* Self-driven WSe₂/Bi₂O₃Se van der waals heterostructure photodetectors with high light On/Off ratio and fast response [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(8): 2008351.
- [35] ZHENG H, JIANG Y, YANG S, *et al.* ZnO nanorods array as light absorption antenna for high-gain UV photodetectors[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 812: 152158.
- [36] 袁兆林,胡宇杰,吕季辉,等. ZnO纳米线阵列/PVK异质结紫外光探测器特性[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2204001.
- YUAN ZH L, HU Y J, LÜ J H, *et al.* Characteristics of ZnO nanowire arrays/PVK heterojunction ultraviolet photodetector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22): 2204001. (in Chinese)
- [37] XU N C, YUAN Z L, NIE F J, *et al.* Hydrother-

- mal growth and ultraviolet sensing performance of well-aligned Ga-doped ZnO nanowire arrays [J]. *Optical Materials*, 2022, 133: 112995.
- [38] KUMAR C, KUSHWAHA B K, KUMAR A, *et al.* Fibrous Al-Doped ZnO thin film ultraviolet photodetectors with improved responsivity and speed [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(6): 337-340.
- [39] JENISH S L, VALANARASU S, PRAKASH B, *et al.* Improved optical and electrical properties of Fe doped ZnO nanostructures facilely deposited by low-cost SILAR method for photosensor applications [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 31: 102071.

作者简介:



袁兆林(1976—),男,江西丰城人,博士,副教授,硕士生导师,2008年、2011年于电子科技大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电探测材料与器件方面的研究。E-mail: yzlyx98@sina.com