



具有高光开关比和高响应度的单根 In_2O_3 纳米线紫外光电晶体管

陈雪, 魏志鹏

引用本文:

陈雪, 魏志鹏. 具有高光开关比和高响应度的单根 In_2O_3 纳米线紫外光电晶体管[J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 208–214.

CHEN Xue, WEI Zhi-peng. Single In_2O_3 Nanowire Ultraviolet Phototransistor with High Optical On-off Ratio and High Responsivity[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(2): 208–214.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200376>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CH₃NH₃PbBr₃表面修饰对SnO₂基光电探测器性能的影响

Effect of Surface Decoration of CH₃NH₃PbBr₃ on Performance of SnO₂-based Photodetector

发光学报. 2019, 40(10): 1261–1266 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194010.1261>

InSe/Se范德瓦尔斯异质结的可控制备及其高响应度广光谱光电探测器

Controlled Fabrication InSe/Se Van Der Waals Heterojunction for High Responsivity Broadband Photodetectors

发光学报. 2019, 40(11): 1409–1416 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194011.1409>

氧化镓薄膜的制备及其日盲紫外探测性能研究

Preparation and Ultraviolet Detection Performance of Ga₂O₃ Thin Films

发光学报. 2015(8): 906–911 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153608.0906>

超长氧化锌纳米线的制备及其气敏性能和紫外传感应用研究

Preparation of Ultra-long ZnO Nanowires and Its Gas Sensing Properties and UV Sensing Application

发光学报. 2014, 35(5): 608–612 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143505.0608>

ZnO单晶和BeZnO合金的生长及其紫外探测器研究

Growth of ZnO Single Crystal and BeZnO Alloy and Ultraviolet Detector

发光学报. 2015, 36(11): 1233–1239 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153611.1233>

文章编号: 1000-7032(2021)02-0208-07

具有高光开关比和高响应度的单根 In_2O_3 纳米线紫外光电晶体管

陈 雪, 魏志鹏*

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: In_2O_3 纳米线由于其独特性质而成为紫外光电探测器的潜力候选者, 目前, In_2O_3 纳米线基紫外光电探测器已被广泛研究, 但较大的暗电流限制了其进一步应用。本文制备了 In_2O_3 纳米线紫外光电晶体管, 通过背栅电压的调制作用, 器件中的暗电流几乎被全部耗尽, 同时, 由于光照下的阈值偏移, 栅压对光电流的影响较小。最终得到具有高光开关比(1.07×10^8)和高响应度(5.58×10^7 A/W)的单根 In_2O_3 纳米线紫外光电晶体管, 性能明显优于之前报道的 In_2O_3 纳米结构光电探测器。本工作促进了 In_2O_3 纳米线在下一代纳米光电子器件和集成电路中的应用。

关键词: In_2O_3 纳米线; 紫外; 光电晶体管; 响应度

中图分类号: O472.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200376

Single In_2O_3 Nanowire Ultraviolet Phototransistor with High Optical On-off Ratio and High Responsivity

CHEN Xue, WEI Zhi-peng*

(State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: zpweicust@126.com

Abstract: Owing to the unique properties, In_2O_3 nanowires have become potential candidates for ultraviolet photodetectors. To date, In_2O_3 nanowires-based UV photodetectors have been extensively studied. However, the large dark current limits its further applications. In this paper, a single In_2O_3 nanowire ultraviolet phototransistor is performed. Through the modulation of the back gate voltage, the dark current is almost completely depleted. At the same time, the threshold voltage shows a shift under illumination, leading to little dependence between gate voltage and photocurrent. Finally, a single In_2O_3 nanowire ultraviolet phototransistor with a high optical on-off ratio of 1.07×10^8 and a high responsivity of 5.58×10^7 A/W was obtained, which is better than the previously reported In_2O_3 nanostructured optoelectronic devices. This work promotes the application of In_2O_3 nanowires in the next generation of nano-optoelectronic devices and integrated circuits.

Key words: In_2O_3 nanowire; ultraviolet; phototransistor; responsivity

收稿日期: 2020-12-08; 修订日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61904017, 62074018, 12074045); 高功率半导体激光器国家重点实验室基金; 吉林省科技发展计划(20200301052RQ); 吉林省教育厅项目(JJKH20200763KJ); 长春理工大学青年基金(XQNJJ-2018-18)资助项目 Supported by National Natural Science Foundation of China(61904017, 62074018, 12074045); Foundation of State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers; Developing Project of Science and Technology of Jilin Province(20200301052RQ); Project of Education Department of Jilin Province(JJKH20200763KJ); Youth Foundation of Changchun University of Science and Technology(XQNJJ-2018-18)

1 引言

一维氧化铟 (In_2O_3) 纳米线由于具有优秀的化学稳定性、较宽的带隙、高光学透明性以及高场效应载流子迁移率,被认为是下一代电子器件、传感器、紫外光电器件的杰出候选者^[1-4]。目前,基于 In_2O_3 纳米线的紫外光电探测器已被报道^[2,5-7]。但是,由于其具有较大的暗电流, In_2O_3 纳米线光电探测器通常表现出较小的光开关比,严重限制了光电探测器探测微弱信号的能力。

在先前的报道中,研究人员发现在基于 In_2O_3 纳米线的场效应晶体管中,其通常表现为耗尽型^[8],意味着场效应晶体管为常开器件,这也是 In_2O_3 纳米线紫外光电探测器暗电流较大的原因。通过场调制效应,可将晶体管由开态调整为关态,此时 In_2O_3 纳米线场效应晶体管将具有极低的输出电流。然而,目前报道的 In_2O_3 纳米结构光电晶体管性能较低^[9],这和光照下器件的光电流也被栅极电场抑制具有很大关系。

本文通过化学气相沉积法 (Chemical vapor deposition, CVD) 生长了 In_2O_3 纳米线,并将其制备成 In_2O_3 纳米线光电二极管及光电晶体管。研究发现,通过场效应调制, In_2O_3 纳米线中的暗电流几乎被全部耗尽,但光电流却没有明显降低,最终得到的光电晶体管在 254 nm 光照下具有高光开关比 ($\sim 10^8$)、高响应度 ($5.58 \times 10^7 \text{ A/W}$) 和高比探测率 ($9.89 \times 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$),性能优于 In_2O_3 纳米线光电二极管,同时高于之前报道的 In_2O_3 纳米结构光电探测器。研究结果充分表明了 In_2O_3 纳米线光电晶体管在光电探测领域的优越性,推进了其进一步应用。

2 实验

2.1 样品制备

通过 CVD 方法在卧式管式炉中生长 In_2O_3 纳米线。所用生长衬底为蒸镀有 2 nm Au 颗粒的纯 Si 衬底,所用药品为 In_2O_3 粉末和纳米碳粉,比例为 10:1。生长温度为 1 050 $^\circ\text{C}$,生长时间为 1 h,载气为 $\text{Ar}:\text{O}_2(100:2)$ 混合气,气流量为 200 mL/min。生长结束后继续通入混合气,直至衬底自然降温至室温。

2.2 器件的制备

采用物理转移法,将生长好的纳米线转移到带有定位标记的 SiO_2/Si 衬底上 ($\text{SiO}_2 \sim 300$

nm),选取直径 $\sim 100 \text{ nm}$ 的纳米线,通过微纳加工过程制备电极 ($\text{Au}/\text{Cr} \sim 50 \text{ nm}/15 \text{ nm}$)。具体步骤为:CAD 画出电极图形;旋涂光刻胶 (MMA/PMMA);电子束光刻;显影;蒸金、剥离。制备好器件后,采用半导体参数分析仪对器件进行电学性能测试及光电性能测试,其中,光电性能测试所用光源为 254 nm 手提式紫外分析仪,光功率密度为 $0 \sim 0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。

3 结果与讨论

3.1 纳米线的基本表征

采用扫描电子显微镜 (SEM) 表征 In_2O_3 纳米线的形貌,如图 1 所示。由 SEM 图像可见,生长好的样品存在大量较细直径的纳米线,同时也存在一定量较大直径的微米线。其中纳米线直径在 70 ~ 120 nm 范围内,同时具有数十微米的长度。

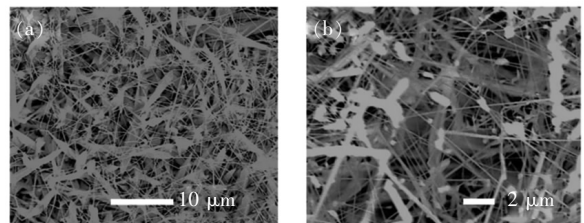


图 1 In_2O_3 纳米线的 SEM 图。(a)放大 2 000 倍;(b)放大 6 500 倍。

Fig. 1 SEM images of the In_2O_3 nanowires. (a) 2 000 \times . (b) 6 500 \times .

为便于后续器件制备,我们选取直径 $\sim 100 \text{ nm}$ 的单根纳米线进行了微区拉曼测试,如图 2 所示。可见纳米线在 227.7 cm^{-1} 和 303.4 cm^{-1} 处表现出两个明显的拉曼位移峰,分别来源于亚稳态刚玉结构 In_2O_3 和立方相 In_2O_3 ^[10]。

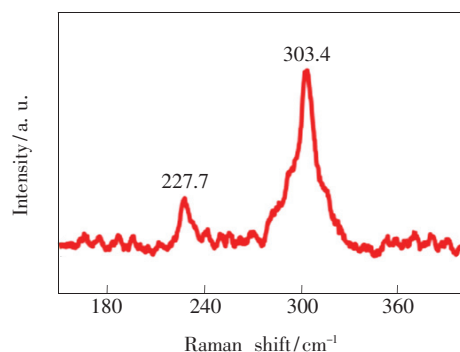


图 2 In_2O_3 纳米线(直径: $\sim 100 \text{ nm}$)的微区拉曼图

Fig. 2 μ -Raman image of the In_2O_3 nanowire with the diameter of $\sim 100 \text{ nm}$

3.2 In_2O_3 纳米线光电二极管

采用微纳加工工艺将单根 In_2O_3 纳米线制备成光电二极管,器件结构示意图如图 3(a)所示,其中,纳米线直径约为 100 nm,沟道长度为 2 μm 。随后,对光电二极管在暗场和紫外光照(254 nm, 0.178 mW/cm^2)下的 I - V 特性进行表征,如图 3(b)所示,其中插图为器件的 SEM 图像,比例尺为 2 μm 。可见器件在紫外光照下具有明显的光响应。

光开关比($I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$)、响应度(R)和比探测率(D^*)是衡量光电探测器探测能力的重要指标,其中光开关比定义为光电探测器所产生的光电流和暗电流的比值,光开关比和比探测率用于衡量探测器检测微弱信号的能力,响应度用于衡量探测器将光信号转换为电信号的能力。响应度和比探测率可通过下式计算得到^[11-13]:

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{A \times P}, \quad (1)$$

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2e \times I_{\text{dark}}/A}}, \quad (2)$$

其中 I_{light} 是光电流, I_{dark} 是暗电流, P 是光功率密度, A 是光敏区域, e 是电子电量。由图 3(b)可知,虽然器件可以产生光电流,但是,由于此时光电二极管的暗电流较大,导致器件的光开关比很小(小于 2),因此难以区分噪声信号,不利于实现弱信号的探测。此外,计算了器件在不同电压下的响应度和比探测率,如图 3(c)和 3(d)所示。可见器件的响应度和比探测率随偏压的变化而变化,并在 1 V 电压下达到峰值,此时,器件的光开关比为 1.3,响应度为 1.0×10^7 A/W ,比探测率为 1.98×10^{14} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$ 。由此可知, In_2O_3 纳米线光电二极管虽然具有较高的光响应度,但其较大的暗电流限制了器件探测微弱信号的能力。因此, In_2O_3 纳米线光电二极管不利于实际应用。

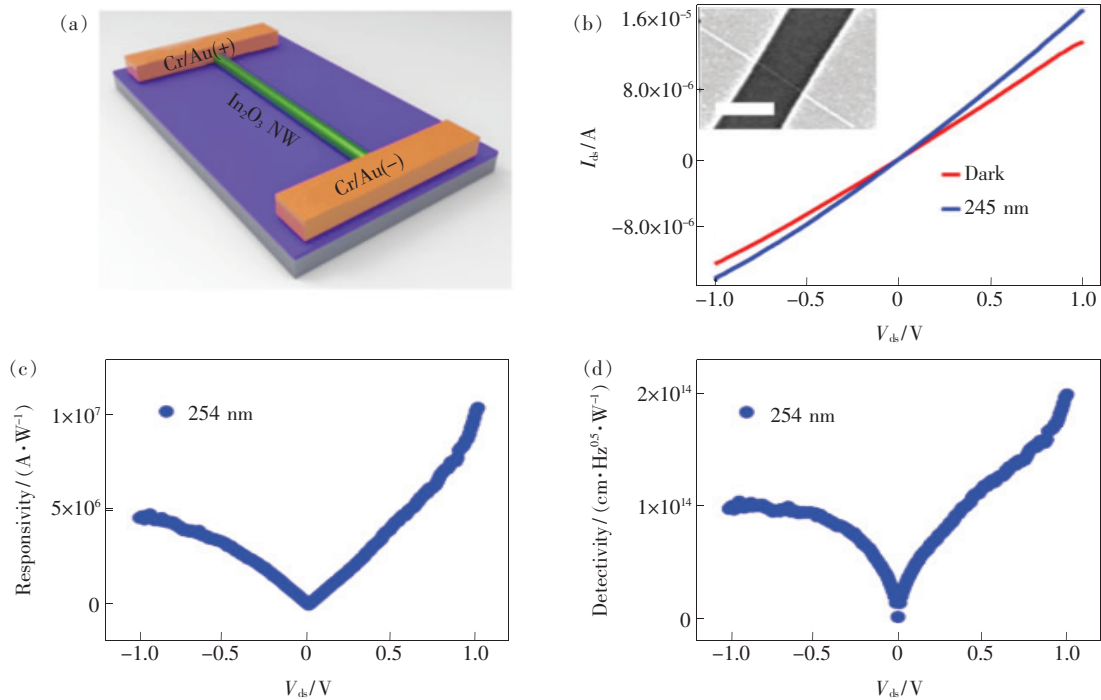


图 3 In_2O_3 纳米线光电二极管的基本特性。(a) 器件结构示意图;(b) 器件在暗场和 254 nm, 0.178 mW/cm^2 光照下的 I - V 曲线,插图为器件的 SEM 图,比例尺为 2 μm ;(c) 器件响应度与偏压的依赖性关系;(d) 器件比探测率与偏压的依赖性关系。

Fig. 3 Characteristics of In_2O_3 nanowire photodiodes. (a) Schematic diagram of the device structure. (b) I - V curves of the device at dark and 254 nm (0.178 mW/cm^2) illumination, the inset is the SEM image of the device, scale bar: 2 μm . (c) Dependence of the responsivity on the bias voltage. (d) Dependence of specific detectivity on bias voltage.

3.3 In_2O_3 纳米线场效应晶体管

将 In_2O_3 纳米线制备成背栅型场效应晶体

管,并对其进行基本电学特性表征。图 4(a)和 4(b)分别为器件在 $V_{\text{ds}} = 1$ V 下的转移特性曲线

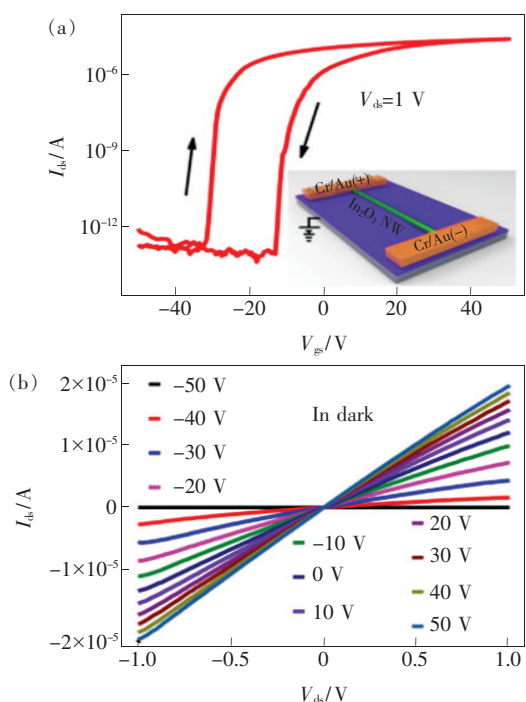


图4 In_2O_3 纳米线场效应晶体管的基本特性。(a) 器件在 $V_{ds} = 1 \text{ V}$ 下的转移特性曲线及其回滞, 插图是器件结构示意图; (b) 器件在不同栅压下 ($-50 \sim 50 \text{ V}$) 的输出特性曲线。

Fig. 4 Characteristics of In_2O_3 nanowire field effect transistors. (a) Transfer characteristic and hysteresis of the device when $V_{ds} = 1 \text{ V}$, the inset is the schematic diagram of the device. (b) Output characteristic of the device under different gate voltages ($-50 \sim 50 \text{ V}$).

以及器件在不同栅压下的输出特性曲线, 可见器件具有明显的场调制效应。 I_{ds} 随着栅压的增加而增加, 表明器件呈现出 N 型导电性, 且具有极低的关态电流 $\sim 10^{-12}$ 以及极高的开态电流 $\sim 10^{-5}$, 开态电流和关态电流的比值高达 10^7 , 表明其作为开关器件的应用潜力。此外, 器件具有较为明显的回滞, 回滞和器件中存在的界面态息息相关, 器件具有回滞, 表明其中存在较为明显的界面态^[11]。器件的场效应迁移率 (μ) 和场诱导载流子浓度 (n) 可用下式计算^[14]:

$$\mu = \frac{g_m L^2}{C_g V_{ds}}, \quad (3)$$

其中, g_m 是器件的跨导, 定义为 $g_m = dI_{ds}/dV_{gs}$; L 是沟道长度; C_g 是背栅电容, 为:

$$C_g = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r L}{\ln(4h/r)}, \quad (4)$$

其中 ϵ_0 是真空介电常数, ϵ_r 是 SiO_2 的相对介电

常数, h 是氧化层厚度, r 为纳米线直径。载流子浓度可用下式计算:

$$n = \frac{4C_g(V_{gs} - V_{th})}{\pi q d^2 L}, \quad (5)$$

V_{th} 是器件的阈值。计算得到器件的场效应迁移率约为 $121 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 载流子浓度约为 $5.75 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ($V_{gs} = 0$)。

3.4 In_2O_3 纳米线光电晶体管

为表明 In_2O_3 纳米线场效应晶体管作为光电晶体管的应用潜力, 进一步测试了其作为光电晶体管的基本特性, 如图 5 所示。图 5(a) 为器件在暗场及 254 nm 、 0.178 mW/cm^2 光照下的转移特性曲线 ($V_{ds} = 1 \text{ V}$), 可见, 在光照下, 器件具有较高的光电流。光电流虽然和栅压具有一定的依赖关系, 但是, 即便是在最强的反向栅压下, 器件的光电流依然无法耗尽, 导致器件具有极高的光开关比。为进一步比较器件性能与栅压的依赖关系, 分析了在 254 nm 、 0.178 mW/cm^2 光照下, 器件光开关比、响应度和比探测率与栅压的依赖关系, 如图 5(b) ~ (d) 所示。

从图中可以看出, 随着栅压的调制, 器件的光开关比可高达 10^8 , 明显优于 In_2O_3 纳米线光电二极管。此外, 器件的光响应度和比探测率也随着栅压的变化而变化, 但其变化幅度较弱, 同时其峰值皆出现在 -25 V 栅压附近。对比此时的暗场转移特性曲线, 场效应管并非处于关态, 这和光照所导致的阈值电压偏移有关。光照下, 器件阈值电压会向反向移动, 导致最大光生电流不发生在暗场关态电压处, 这将导致光开关比明显减小。此时, 器件的光开关比为 50, 虽然数值较低, 但仍不利于微弱光信号的检测。因此, 为了同时得到优化的光电晶体管性能, 应使光电晶体管工作于暗场关态电压处 (-32.5 V), 此时, 器件的光开关比为 1.07×10^8 , 响应度为 $5.58 \times 10^7 \text{ A/W}$, 比探测率为 $9.89 \times 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$ 。光电晶体管性能明显优于光电二极管, 同时, 高于文献报道的 In_2O_3 纳米结构光电探测器, 如表 1 所示^[7,9,15-17]。

线性动态范围 (LDR) (G_{LDR}) 也是衡量器件性能指标的重要参数, 并可通过下式计算:

$$G_{LDR} = 20 \lg(J_{ph}^*/J_d), \quad (6)$$

其中 J_{ph}^* 是光强为 0.178 mW/cm^2 时的光电流, J_d 是暗电流^[18]。为此测试了不同光照强度下 In_2O_3

纳米线光电晶体管的转移特性($V_{ds} = 1$ V),并给出光电流和光功率密度的依赖关系($V_{gs} = -32.5$ V),如图

图 6 所示。计算得到器件的 LDR 为 160 dB, 优于 Si 探测器(120 dB)和 InGaAs 探测器(66 dB)^[18]。

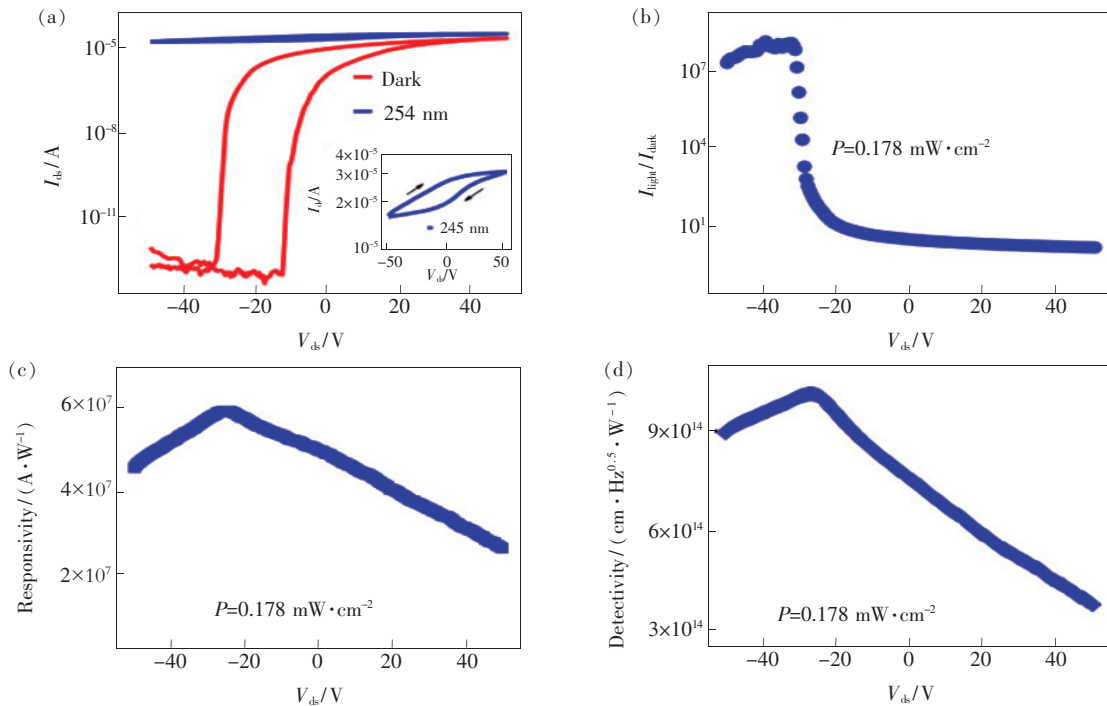


图 5 In_2O_3 纳米线光电晶体管的基本特性。(a)暗场及 254 nm($0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$)光照下的转移特性曲线,插图为光照下的转移特性曲线;(b)器件在 254 nm, $0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 光照下的光开关比;(c)254 nm, $0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 光照下,器件响应度与栅压的依赖关系;(d)254 nm, $0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 光照下,器件比探测率与栅压的依赖关系。

Fig. 5 Characteristics of In_2O_3 nanowire phototransistor. (a) Transfer characteristic at dark and 254 nm ($0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$) illumination. (b) $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$ of the device under 254 nm ($0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$) illumination. (c) Dependence of the responsivity on the bias voltage, under 254 nm ($0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$) illumination. (d) Dependence of the specific detectivity on the bias voltage, under 254 nm ($0.178 \text{ mW}/\text{cm}^2$) illumination.

表 1 In_2O_3 纳米结构光电探测器的关键性能参数对比

Tab. 1 Comparison of key performance parameters of In_2O_3 nanostructured photodetectors

材料	光开关比	响应度/ $(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	比探测率/ $(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献
In_2O_3 纳米线	<2	2.24×10^4		[7]
In_2O_3 纳米线	140			[15]
2D SnO/ In_2O_3	24	1 047	5×10^9	[9]
$\text{In}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 薄膜		799.5	1.1×10^{12}	[16]
$\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 纳米线		11.17	3.14×10^{14}	[17]
In_2O_3 纳米线	1.07×10^8	5.58×10^7	9.89×10^{14}	本文

据报道,金属氧化物纳米线的缺陷态主要来源于纳米线表面的氧空位^[15]。暗场下,吸附在纳米线表面的氧分子捕获了 In_2O_3 纳米线中的部分自由电子,从而形成负氧离子 $[\text{O}_2(\text{g}) + e^- \rightarrow \text{O}_2^-]$,并在纳米线表面附近形成耗尽区,同时,背栅电场的调制作用将暗电流全部耗尽。光照下,光生电子-空穴对被耗尽区形成的内建电场分离,光生空

穴运动到纳米线表面,释放负氧离子 $[h^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O}_2(\text{g})]$,导致氧的脱附,在氧分子的重吸收过程中,未与光生空穴复合的光生电子移向沟道并被电极收集,从而产生明显的光电流^[9,15,19-20]。此外,在光照下晶体管内的载流子浓度增加,器件的阈值电压发生偏移,需要更大的反向栅压调制才能将载流子耗尽,而高的载流子浓度也会降低接

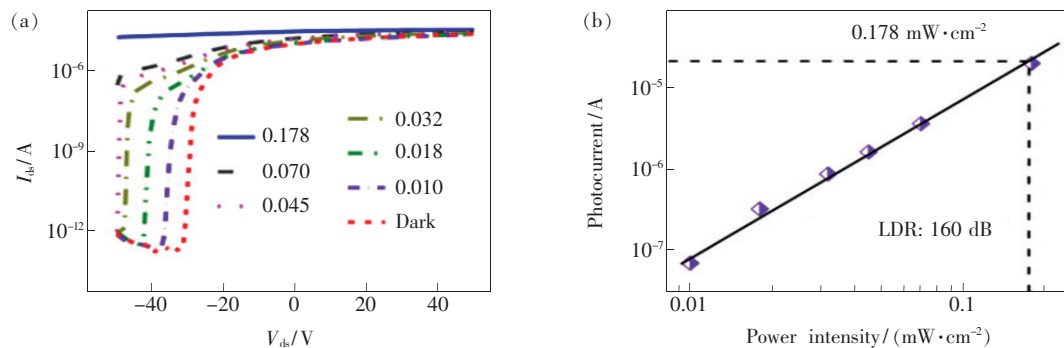


图6 不同光照强度下, In_2O_3 纳米线光电晶体管的基本特性。(a)不同光强下晶体管的转移特性曲线;(b) $V_{\text{gs}} = -32.5$ V时,光电流和光强的依赖性关系。

Fig. 6 Characteristics of In_2O_3 nanowire phototransistor under different illumination power intensities. (a) Transfer characteristic of the phototransistor under different illumination power intensities. (b) Dependence of the photocurrent on the illumination power intensities, $V_{\text{gs}} = -32.5$ V.

触电阻,使更多的光生载流子被收集。因此,光电晶体管的高性能主要来源于纳米线表面氧分子的吸附和解吸,以及光照下场效应管阈值电压的偏移。

4 结 论

本文制备了 In_2O_3 纳米线光电二极管,并对其基本光开关比、响应度和比探测率进行了分析。虽然光电二极管具有较高的光响应度,但是,器件

的暗电流较大,光开关比很小,不利于微弱信号的探测。通过将其制备成光电晶体管,可通过栅压调制将暗电流全部耗尽,而对于光电流却影响较小。最终,在 254 nm 、 $0.178\text{ mW}/\text{cm}^2$ 光照下可得到光开关比为 1.07×10^8 、响应度为 $5.58 \times 10^7\text{ A}/\text{W}$ 、比探测率为 $9.89 \times 10^{14}\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} \cdot \text{W}^{-1}$ 的 In_2O_3 纳米线紫外光电晶体管,性能明显优于先前报道的 In_2O_3 纳米结构光电探测器,促进了 In_2O_3 纳米线光电晶体管的进一步应用。

参 考 文 献:

- [1] YU Y, LI W Q, WU P C, *et al.*. Gate dielectric ion implantation to modulate the threshold voltage of In_2O_3 nanowire field effect transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(19):193505-1-5.
- [2] MENG M, WU X L, JI X L, *et al.*. Ultrahigh quantum efficiency photodetector and ultrafast reversible surface wettability transition of square In_2O_3 nanowires [J]. *Nano Res.*, 2017, 10(8):2772-2781.
- [3] XU Q, LIU X Q, WAN B S, *et al.*. In_2O_3 nanowire field-effect transistors with sub-60 mV/dec subthreshold swing stemming from negative capacitance and their logic applications [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9):9608-9616.
- [4] CHEN Y Y, YANG S M, LU K C. Synthesis of high-density indium oxide nanowires with low electrical resistivity [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(11):2100-1-7.
- [5] ZHANG D, LI C, HAN S, *et al.*. Ultraviolet photodetection properties of indium oxide nanowires [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, 77(1):163-166.
- [6] ZHANG Z G, WANG X X, ZHANG J, *et al.*. Recent advances in 1D micro- and nanoscale indium oxide structures [J]. *J. Alloys Compd.*, 2018, 752:359-375.
- [7] LI X, XIONG X, ZHANG Q. Performance-enhancing ultraviolet photodetectors established on individual In_2O_3 nanowires via coating a CuO layer [J]. *Mater. Res. Express*, 2017, 4(4):045018-1-15.
- [8] ZOU X M, LIU X Q, WANG C L, *et al.*. Controllable electrical properties of metal-doped In_2O_3 nanowires for high-performance enhancement-mode transistors [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(1):804-810.
- [9] ALSAIF M M Y A, KURIKAKOSE S, WALIA S, *et al.*. 2D $\text{SnO}/\text{In}_2\text{O}_3$ van der Waals heterostructure photodetector based on printed oxide skin of liquid metals [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2019, 6(7):1900007-1-25.

- [10] ZHANG W H,ZHANG W D. Synthesis and optical properties of nanosheet-based rh-In₂O₃ microflowers by triethylene glycol-mediated solvothermal process [J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2013,74(9):1271-1274.
- [11] GUO N,HU W D,LIAO L,*et al.*. Anomalous and highly efficient InAs nanowire phototransistors based on majority carrier transport at room temperature [J]. *Adv. Mater.*, 2014,26(48):8203-8209.
- [12] ZHU X T,LIN F Y,ZHANG Z H,*et al.*. Enhancing performance of a GaAs/AlGaAs/GaAs nanowire photodetector based on the two-dimensional electron-hole tube structure [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(4):2654-2659.
- [13] CHEN X,WANG D K,WANG T,*et al.*. Enhanced photoresponsivity of a GaAs nanowire metal-semiconductor-metal photodetector by adjusting the Fermi level [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019,11(36):33188-33193.
- [14] ZHENG D S,WANG J L,HU W D,*et al.*. When nanowires meet ultrahigh ferroelectric field-high-performance full-depleted nanowire photodetectors [J]. *Nano Lett.*, 2016,16(4):2548-2555.
- [15] MAZOUCHI M,SARKAR K,PURAHMAD M,*et al.*. Photoconduction mechanism of ultra-long indium oxide nanowires [J]. *Solid-State Electron.*, 2018,148:58-62.
- [16] MOUDGIL A,SHARMA K K,DAS S. In₂O₃/TiO₂ heterostructure for highly responsive low-noise ultraviolet photodetector [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2020,67(1):166-172.
- [17] POOJA P,CHINNAMUTHU P. Surface state controlled superior photodetection properties of isotype n-TiO₂/In₂O₃ heterostructure nanowire array with high specific detectivity [J]. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 2019,19:34-41.
- [18] GONG X,TONG M H,XIA Y J,*et al.*. High-detectivity polymer photodetectors with spectral response from 300 nm to 1 450 nm [J]. *Science*, 2009,325(5948):1665-1667.
- [19] HUANG X Y,CHI Z T,LIU J,*et al.*. Enhanced gas sensing performance based on p-NiS/n-In₂O₃ heterojunction nanocomposites [J]. *Sens. Actuators B-Chem.*, 2020,304:127305-1-11.
- [20] JIANG J,LING C Y,XU T,*et al.*. Defect engineering for modulating the trap states in 2D photoconductors [J]. *Adv. Mater.*, 2018,30(40):1804332-1-6.



陈雪(1992 -),女,吉林长春人,博士研究生,2015年于吉林师范大学获得学士学位,主要从事纳米光电子器件方面的研究。
E-mail: streamchen520@yahoo.com



魏志鹏(1978 -),男,吉林长春人,博士,教授,博士研究生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件方面的研究。
E-mail: zpweicust@126.com