

ZnO NW 栅极 GaN HEMT 紫外光探测性能

朱彦旭¹, 谭张杨¹, 王晓冬²

(1. 北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 中国人民警察大学警务装备技术学院, 河北廊坊 102308)

摘要: 本文实验采用水热生长法, 成功制备了以 ZnO 纳米线为光感应栅极的高电子迁移率晶体管 HEMT (High Electron Mobility Transistor) 器件. 对 HEMT 进行源漏 (S/D) 下刻蚀, 刻蚀深度为 120/150 nm, 探究不同 S/D 刻蚀深度对器件性能的影响. 同时, 利用磁控溅射法在栅电极沉积 ZnO 晶籽层, 在 80°C 温度下控制水热生长时间分别为 6/8/10 h, 探究不同水热生长时间对 ZnO 纳米线表面形貌以及 HEMT 紫外探测性能的影响. 结果表明, 相较于常规结构器件, ZnO 纳米线栅极器件在 350~450 nm 波长范围内具有更高的光吸收率. 同样的水热生长时间下, 刻蚀深度为 150 nm 时源漏饱和电流相较于 120 nm 器件较小, 但黑暗/紫外光照下的饱和电流差值更大, 最大达到了 8 mA, 对紫外光表现出更高的探测效率. 水热生长时间控制为 6 h 时纳米线生长形貌良好, 且在该生长时间下刻蚀深度为 150 nm 时, 器件光响应/恢复时间达到了最小值, 分别为 0.005 7 s、2.128 s.

关键词: 高电子迁移率晶体管; ZnO 纳米线; 紫外探测; 光响应

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2017YFB0402803)

中图分类号: TN23

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)09-2510-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211634

UV Detection Performance of ZnO NW Gate GaN HEMT Research

ZHU Yan-xu¹, TAN Zhang-yang¹, WANG Xiao-dong²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. School of Police Equipment Technology, People's Police University of China, Langfang, Hebei 102308, China)

Abstract: A high electron mobility transistor (HEMT) device with ZnO nanowires as light sensing gate is successfully prepared by hydrothermal growth method. The HEMT is etched under source drain (S/D) with an etching depth of 120/150 nm to explore the effects of different S/D etching depths on the device performance. At the same time, ZnO crystal seed layer is deposited on the gate electrode by magnetron sputtering. The hydrothermal growth time is controlled to 6/8/10 h at 80°C to explore the effects of different hydrothermal growth time on the surface morphology of ZnO nanowires and the UV detection performance of HEMT. The results show that compared with conventional devices, ZnO nanowire gate devices have higher optical absorptivity in the wavelength range of 350~450 nm. Under the same hydrothermal growth time, when the etching depth is 150 nm, the source drain saturation current is smaller than that of 120 nm, but the saturation current difference under dark/ultraviolet light is larger, up to 8 mA, showing higher detection efficiency for ultraviolet light. When the hydrothermal growth time is controlled to 6 h, the growth morphology of nanowires is good, and when the etching depth is 150 nm, the optical response/recovery time of the device reaches the minimum, which are 0.005 7 s and 2.128 s respectively.

Key words: high electron mobility transistor; ZnO nanowires; UV detection; light response

Foundation Item(s): National Key R&D Program Funded Project (No.2017YBB0402803)

1 引言

作为具有代表性的第三代半导体材料, GaN 具有较高的禁带宽度 (3.4 eV)^[1], 能应用在高温、高功率条件下. 其化合物结构与纤锌矿类似, 具有硬度高、化学稳定性良好, 耐腐蚀性能强等特性, 在大功率微波器件及激光器等领域都具有较好的应用前景^[2,3]. GaN/Al-

GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) 由于异质结界面处的自发极化以及压电极化效应, 在该处形成很强的内建电场, 对 GaN 能带结构进行调制, 从而吸引了大量电子在该界面处形成一薄层二维电子气 (Two-Dimensional Electron Gas, 2DEG)^[4], 该薄层十分靠近器件表面, 当表面状态变化时, 2DEG 浓度发生改变^[5], 从而使得源漏电流变化. 该性能使得 HEMT 器件在光电

探测领域表现良好,将器件与感光材料进行结合,可以通过检测源漏电流的变化来达到对表面状态变化的响应,从而对外界光照环境的变化进行监测。

ZnO 是一种新型的直接带隙宽禁带半导体材料,与 GaN 材料的晶格失配度较小,能够实现高质量的外延生长。室温时带隙宽度为 3.37 eV,激子结合能达到了 60 meV^[6],具有高击穿电场、高热导率、高化学稳定性^[7]以及优异的光电特性。它们被广泛用于激光、发光二极管、气体传感器和紫外线探测器等领域^[8]。其中紫外线探测器可用于污染监测、安全空间通信等商业和军事目的^[9]。在这些实际的应用中,要求监测设备具有较高的响应度、灵敏度以及较快的响应、恢复时间。这些参数会受到表面结构、生长工艺、材料缺陷的影响,且与 ZnO 表面对氧的吸附特性密切相关。在 ZnO 丰富的纳米结构家族中,ZnO 纳米线(Nanometre Wire, NW)具有较大的表面积体积比,能提供更多的表面陷阱能级,加速对 O₂ 的吸附和解吸^[10],使器件具有更大的光电流和更快的响应速度,同时有效减少了晶格失配和热失配问题,提高材料性能。

传统在 Si 或 ITO(Indium Tin Oxide)衬底上直接制备 ZnO 薄膜或纳米线来实现对紫外光的探测,器件的响应时间普遍较长且光响应度较小,2014 年, Li 等人制备的 ZnO 纳米棒阵列紫外探测器响应时间高达 38.1 s,次年, Mohammad 等^[11]在以一种新型超薄、高柔性材料为基底制备的 ZnO NW 探测器最高响应度仅为 0.070 66 A/W。相较于 SiC 材料, GaN 器件开关损耗更低,更适应于高频工作环境。2012 年, Biondo 等^[12]制备了具有 p 型掺杂的 SiC 紫外探测器,响应峰值仅为 0.03 A/W。将 ZnO NW 作为感光栅极与 GaN HEMT 结合^[13],利用 HEMT 对表面状态变化敏感及 ZnO 对紫外光的吸收特性,制备响应度高、响应速度快的高性能探测器件并探究不同条件对其紫外光探测性能的影响。

2 实验

2.1 ZnO NW 栅极 GaN HEMT 探测器制备

实验选用增强型外延片,结构如下图 1 所示。传统的 HEMT 器件,由于异质结处二维电子气的存在,使得

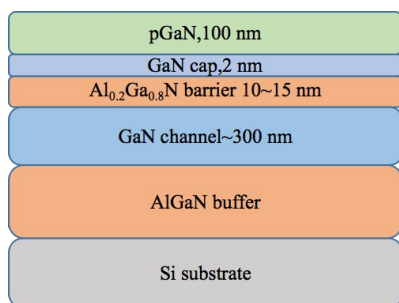


图 1 AlGaIn/GaN 外延片结构

器件在没有外加电压的情况下便能处于导通状态。此处用 p-GaN 作为栅帽层可以得到 GaN 基增强型 HEMT 器件:栅下方的 P-GaN 与 AlGaIn/GaN(非故意掺杂时为 n 型)层形成 pn 结, p-GaN 中的多子空穴朝 AlGaIn 方向扩散,由于 AlGaIn 层很薄,空穴扩散距离远大于 AlGaIn 层厚度,扩散过去的空穴使该处的 2DEG 被中和。从能带角度来看, p-GaN 层拉高了 AlGaIn 层势垒,使原来异质结面处的量子阱被抬高,阱深变浅以至高于费米能级使得 2DEG 耗尽,在未人为外加电压时,沟道不导通^[14]。实验选用 p-GaN 层覆盖的 AlGaIn/GaN 增强型外延片作为基片, GaN 势垒层厚度为 150~300 nm, AlGaIn 势垒层厚度为 10~15 nm,其中 Al 的摩尔组分占比为 18~23%, p-GaN 帽层厚度为 60~100 nm,其中 Mg 组分掺杂浓度为 $1e^{19} \text{ cm}^{-3} \sim 5e^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。外延衬底材料阈值电压 $\geq 1.0 \text{ V}$,饱和电流 $\geq 300 \text{ mA/mm}$ 。通过光刻、icp 刻蚀、金属溅射等工艺制备 HEMT 器件。具体工艺流程如图 2 所示,其中,源/漏(S/D)电极采用 Ti/Al/Ni/Au(5 nm/50 nm/40 nm/50 nm)叠层金属,退火温度 830 °C,退火时间 30 s。栅(G)电极采用 Ti/Pt(20 nm/150 nm)叠层金属,栅长为 1 μm ,栅源/栅漏间距为 3 $\mu\text{m}/4 \mu\text{m}$ 。

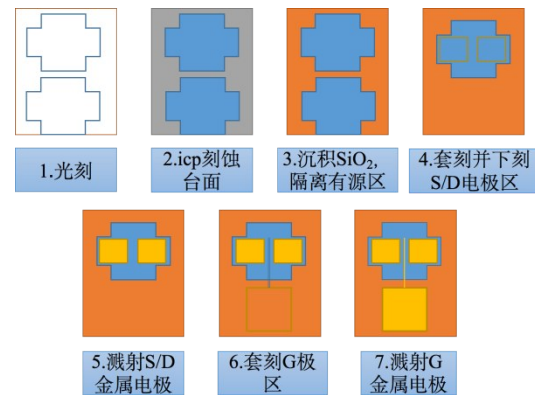


图 2 HEMT 制备工艺流程图

采用水热法在 HEMT 栅电极生长 ZnO NW。具体生长工艺步骤如下:

步骤 1: ZnO NW 生长液的配置。以相同的摩尔比例将六亚甲基四胺(HMTA)和六水合硝酸锌($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)溶质溶于去离子水中,配成 ZnO NW 生长液。其中, HMTA 为 ZnO NW 的生长提供弱碱性环境。生长液使用前,需进行至少 2 小时的磁力搅拌,以使溶质在溶液内均匀分布^[15,16]。

步骤 2: 制备 ZnO 晶籽层。使用磁控溅射,在衬底上溅射 ZnO 薄层。溅射功率 250 W、溅射时间 1 600 s,溅射厚度 200 nm。

步骤 3: 水热生长 ZnO NW。将溅射有 ZnO 晶籽层面的外延片接触生长液,正面朝下悬浮于装有生长液的反应皿中。将反应皿放置在 80 °C 恒温箱中保温数小时,

即可得到 ZnO NW.

2.2 测试与表征

利用紫外可见分光光度计对外延片光透射、光反射率进行测试;采用 GeminiSEM 300 场发射扫描电子显微镜对器件的表面形貌进行表征;采用 Keysight B1500A 半导体器件参数分析仪,对器件的转移特性和输出特性进行测试分析;在手持 365 nm 波段处紫外光功率密度为 320 mW/cm^2 的紫外 LED 光源和 Keysight B1500A 配合下,对器件瞬态响应进行测试.

3 分析与讨论

增强型 AlGaIn/GaN HEMT 紫外光电探测器的结构示意图如图 3 所示. 栅电极处施加电压或接受外界光照时,由栅下方的电场分布变化来调制沟道的夹断与导通,该电场分布范围较大,所以此处保留了栅下以及栅源、栅漏间的 p-GaN 层.

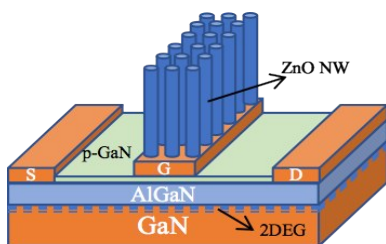


图3 增强型 GaN/AlGaIn HEMT 结构图

不同晶籽层退火温度以及在不同材料表面生长 ZnO NW 可能会对其生长形貌产生影响. 设置有无下电极的两组对比实验,在 AlGaIn/GaN 外延片上直接生长 ZnO 纳米线,同时,将具有下电极的晶籽层在不同温度条件下退火,得到图 4 所示四组 ZnO NW 的表面形貌图,分别为具有下电极(Ti/Pt)且退火温度分别为 300/350/400°C、无下电极时的表面形貌,可以看到在 Ti/Pt 合金上生长的 ZnO NW 垂直性及均匀性较差,且三种晶籽层退火温度的影响不显著,直接在 AlGaIn/GaN 外延片

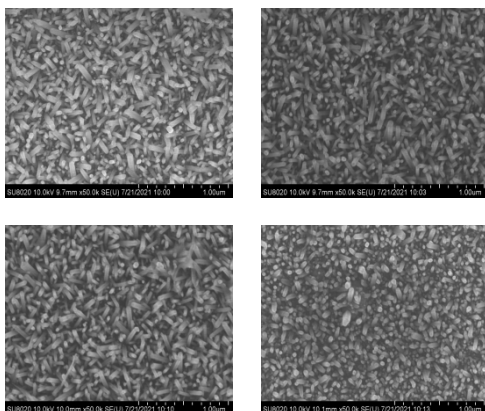


图4 ZnO NW 表面形貌图

生长的 ZnO NW 垂直于基底表面生长,且纳米线顶端大部分显示为六边形,在致密度、均匀性等方面都表现良好. 但在后续的工艺中,由于要对比有无 ZnO NW 的 HEMT 器件的输出等特性,所以依旧在下电极上集成.

实验利用紫外可见分光光度计对有无 ZnO NW 的外延片进行测量,得到波段范围为 300~650 nm 的光透射率及反射率谱线,根据透射率(τ)+反射率(ρ)+吸收率(α)=1,得到如图 5 所示外延片在该波长范围内的吸收率谱线. 可以看到,在紫外光范围内,有 ZnO NW 的外延片明显具有更高的光吸收率,且紫外光波长越短,吸收率越高,这是由于在紫外光的照射下,ZnO 价带电子跃迁至导带,使得紫外光被高效吸收^[17].

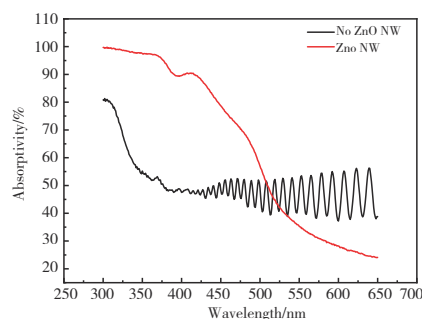


图5 有无 ZnO NW 外延片紫外光吸收率

图 6 分别为 6/8/10 h 水热生长时间下的栅极 ZnO NW 及其放大 SEM 图. ZnO NW 生长形貌受到晶籽层质量、水热溶液配比、生长温度以及生长时间等多方面因素的影响. 可以看到,在其它条件都相同的情况下,水热生长时间为 8 h、10 h 的纳米线形貌较差,8 h 条件下,纳米线十分稀疏且长度较短,10 h 条件下,纳米线尺寸差距较大,生长极其不均匀. 水热生长时间为 6 h 的栅极 ZnO NW 形貌良好,纳米线生长均匀,但与外延片上生长情况相比,栅极纳米线稀疏且形貌差异较大,可能是由于本身纳米尺寸栅极工艺的限制以及集成 HEMT 器件过程中各项工艺的影响. 控制水热生长时间能在一定程度上形成生长情况良好的 ZnO NW,但要达到在栅电极上集成致密度、均匀性以及垂直性都较好的纳米线器件还需要经一步改进工艺参数.

跨导 G_m 是用来衡量反应栅极对器件沟道中电子控制能力大小的参数,其计算公式为:

$$G_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} = \beta D_{dsat} \quad (1)$$

$$\beta = W_{\mu_j} / (dL) \quad (2)$$

其中, β 为跨导系数, W 为栅宽, L 为栅长, d 为 AlGaIn 层厚度. 为研究栅电极生长 ZnO NW 是否对器件跨导产生影响,测试得到如图 7(a)所示不同条件下 HEMT 器件跨导曲线:可以看到,相比于常规器件,有 ZnO NW 栅极的器件最大跨导对应电压值右移;最大跨导值对应的电压为

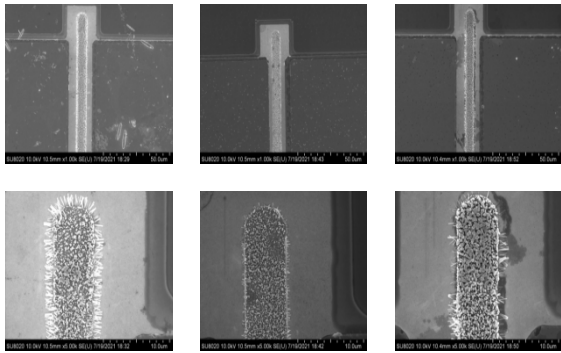
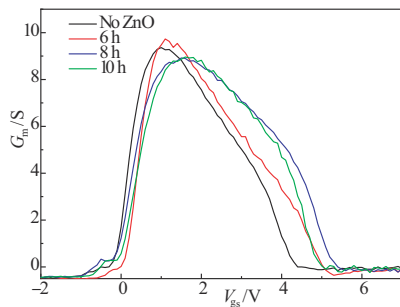
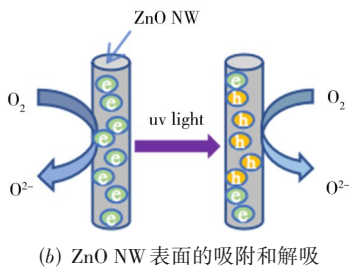


图6 不同水热生长时间ZnO NW的SEM图

器件的开启电压,由此可见,栅极生长 ZnO NW 可提高器件的导电电压值,这是因为在无紫外光照的条件下,ZnO 表面会吸附空气中的 O_2 分子,从导带中抽取电子形成 O_2^- ,从而在表面形成负栅压,使得下方的部分二维电子气耗尽.跨导最大值变化不大,纳米线生长时间为 8 h、10 h 时,跨导值反而减小,这是由于 ZnO 纳米线的氧气吸附与解吸过程需要一定的时间,使得栅极受外界环境调制作用延缓,影响了其对沟道电子的控制能力. ZnO NW 表面吸附及解吸过程如图 7(b)所示.



(a) 不同条件下 HEMT 器件的跨导曲线



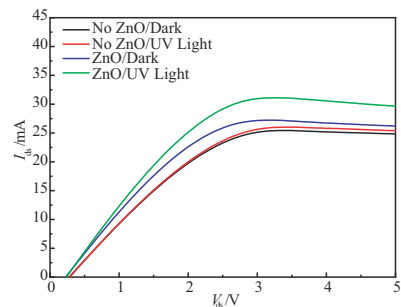
(b) ZnO NW 表面的吸附和解吸

图7 不同水热生长时间对跨导的影响

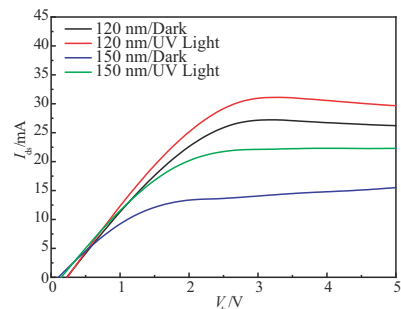
如图 8 所示,是在 $V_{ds}=9.5 V$ 时器件在有无光照下的输出特性曲线. 由图 8(a)可以明显看到,具有 ZnO NW 作为感光栅极的 HEMT 器件在黑暗和紫外光照条件下都具有更大的饱和源漏电流 I_{ds} ,且常规器件在黑暗/紫外光照下饱和电流差值 ΔI_{ds} 仅为 1 mA,而 ZnO NW 感光栅器件 ΔI_{ds} 值达到了 5 mA,具有更明显的光响应. 这是

由于在紫外光照射下,ZnO 导带电子跃迁产生电子-空穴对,空穴与表面 O_2^- 结合,使 O_2^- 解吸,表面的负栅压降低,从而使得沟道 2DEG 浓度增加,沟道电流增大. 此处测量时所用紫外 LED 光功率密度为 $320 mW/cm^2$,光功率的变化会在一定程度范围内引起源漏饱和电流 I_{ds} 值的变化,光功率增强会导致 ZnO 内部激发的电子-空穴对数量增加,从而导致表面 O_2^- 形成的负栅压降低,异质结能带弯曲增强,2DEG 浓度增大,饱和 I_{ds} 增大.

图 8(b)展示了在相同的水热生长时间(6 h)下,源漏刻蚀深度为 120/150 nm 时,器件在黑暗和紫外光照条件下的输出曲线图. 可以看到,刻蚀深度为 120 nm 的器件具有更高的饱和 I_{ds} ,在黑暗/紫外光照条件下分别达到了 31/26 mA. 器件输出特性受源漏欧姆接触影响较大. 源漏叠层金属与 AlGaIn/GaN 异质结实现欧姆接触主要来自于 TiN 低阻层的直接接触机制以及氮空位的隧穿机制. TiN 由最下层金属 Ti 与 AlGaIn 替换反应生成,同时形成大量的氮空位. AlGaIn 层被反应消耗后缩短了隧穿距离使得电子更易隧穿形成良好的欧姆接触. 对源漏电极区域进行整体下刻蚀后,源漏电极金属深入到 AlGaIn/GaN 外延片内部,参照图 1 所示外延片结构,刻蚀深度为 120 nm 时,欧姆金属与二维电子气沟道层十分接近,此时,退火过程中形成的大量低阻态 TiN 扩散进入缓冲层且与电子气沟道连接形成新的导电通道,与氮空位的隧穿机制一起作用使得器件源漏电极具有更好的欧姆接



(a) ZnO NW 及紫外光照对输出特性的影响



(b) 刻蚀深度对输出特性的影响

图8 不同条件对输出特性的影响

触特性^[18,19],而当刻蚀深度进一步增加时,欧姆金属最下层与导电通道距离更远,不利于TiN扩散区域与通道相连,从而输出电流值相对降低.刻蚀深度为150 nm的探测器具有更大的饱和电流差值, ΔI_{ds} 达到了8 mA.同时也分别比较了生长时间分别为8 h、10 h时不同刻蚀深度下的 ΔI_{ds} 值,结果同样显示在刻蚀深度为150 nm时,器件具有更显著的光响应.可见,在一定范围内刻蚀深度的增加能有效增强器件的光响应性能^[20].

图9(a)、图9(b)分别显示了,不同水热生长时间下的输出特性曲线.可以看到,相同的刻蚀深度下,水热生长时间为6 h、8 h的器件具有更大的光响应值,水热时间为10 h的器件饱和电流差值较小仅为2 mA左右.

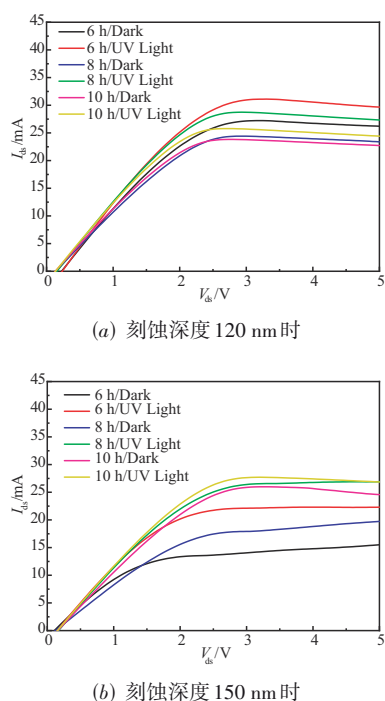


图9 不同水热生长时间对输出特性的影响

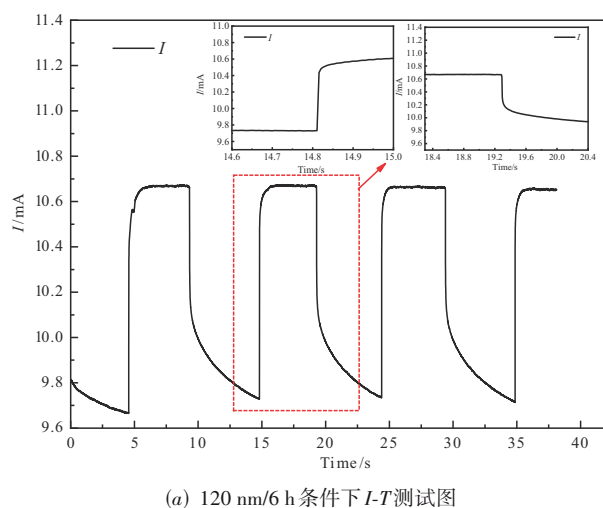
为衡量ZnO NW感光栅HEMT紫外光响应速度,通过控制光源开关频率,得到不同条件下器件瞬态响应曲线.定义上升时间和下降时间分别为UV开启后电流上升至饱和值的90%以及UV关闭后下降至电流最低值的90%所对应的时间^[21].在外置偏压为1.5 V,周期性开关的365 nm紫外光照及黑暗条件下对器件进行周期性光响应测试.如表1所示,展现了不同源漏刻蚀深度及不同水热生长时间下的瞬态响应测量值:刻蚀深度为150 nm、水热生长时间为6 h时,响应、恢复时间都达到了最低值,分别为0.005 7 s、2.128 s,展现出良好的探测效率.器件的快速响应会受到ZnO NW质量的影响,紫外光照射时产生的空穴会被内部的氧空位俘获,导致氧分子在纳米线表面的解吸过程延长并降低了电子在导电通道内的传输.

表1 不同条件下瞬态响应测量值 单位:s

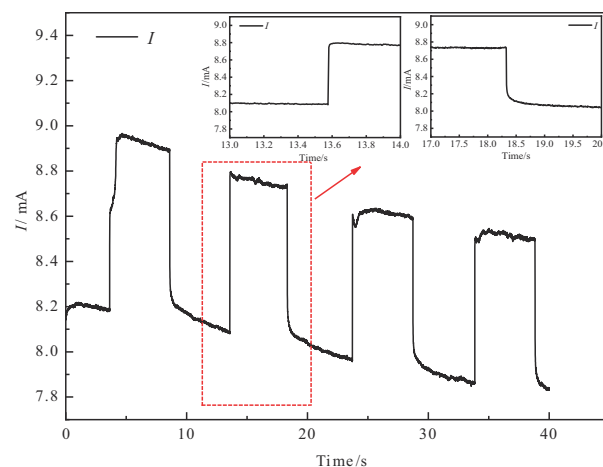
	响应时间		恢复时间	
	120 nm	150 nm	120 nm	150 nm
6 h	0.066 3	0.005 7	4.615	2.218
8 h	0.007 8	0.005 8	4.923	3.438
10 h	0.013 3	0.066 5	2.218	4.339

根据测试结果我们发现,器件光恢复时间普遍高出响应时间三个数量级,这是由于撤去紫外光照后,光生载流子不能立即全部复合,部分被陷阱俘获的空穴需要被发射到价带后导带电子再与其复合,这部分复合过程较慢,使得器件存在持续的光电导(Persistent PhotoConductivity, PPC),大大增加了光恢复时间.因此,通过改善工艺参数,减少ZnO内部氧空位的形成^[22],生长高结晶性、低缺陷密度的纳米线能有效提高器件的光响应及恢复速度.

如图10为不同条件下*I-T*测试图,可以看到,在周期性循环测试中,图10(b)光电流饱和值呈下降趋势,



(a) 120 nm/6 h条件下*I-T*测试图



(b) 150 nm/6 h条件下*I-T*测试图

图10 不同条件下瞬态响应曲线

可能是由于在工艺制备过程中缺陷及杂质的引入,使得该器件稳定性较差.而图 10 (a) 以及其它测试图光电流饱和值则呈现较为平稳的趋势,总体上看,以 ZnO 晶籽层为基底,水热法生长的 ZnO NW 栅极 GaN HEMT 紫外探测器件普遍具有较好的稳定性及重复性,可实用性较强.

4 结论

制备了源漏下刻蚀且以 ZnO NW 为光感应栅极的 GaN HEMT 器件,并对其紫外光探测性能进行了研究.结果表明,相较于常规结构 HEMT,ZnO NW 栅极器件在紫外光波段具有更明显的光吸收能力.且刻蚀深度对器件源漏饱和电流差值存在一定影响.目前看,将源漏电极下刻至接近 2DEG 薄层深度范围,能促进欧姆接触的电子隧穿机制并形成新的导电通道从而增大源漏饱和输出电流 I_{ds} ,而在一定范围内刻蚀深度增加能提高源漏饱和电流差值 ΔI_{ds} ,从而增强器件对紫外光的探测能力.同时,找出了器件紫外光响应及恢复时间最低值的工艺生长条件:刻蚀深度为 150 nm、ZnO NW 水热生长时间为 6 h 时 τ_r 、 τ_f 分别为 0.005 7 s、2.128 s.

参考文献

- [1] FRAYSSINET E, KNAP W, LORENZINI P, et al. High electron mobility in AlGaIn/GaN heterostructures grown on bulk GaN substrates[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(16): 2551-2553.
- [2] DOGAR S, KIM S D. Effects of high-temperature rapid thermal annealing for seed layers on the crystallographic evolution in hydrothermal ZnO nanostructures[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2016, 56: 127-136.
- [3] 朱彦旭, 王岳华, 宋会会, 等. 基于 GaN 基 HEMT 结构的传感器件研究进展[J]. 发光学报, 2016, 37(12): 1545-1553.
ZHU Y X, WANG Y H, SONG H H, et al. Progress of sensor elements based on GaN-based HEMT structure[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(12): 1545-1553. (in Chinese)
- [4] AMBACHER O, FOUTZ B, SMART J, et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaIn/GaN heterostructures[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(1): 334-344.
- [5] KANG B S, WANG H T, REN F, et al. AlGaIn/GaN HEMT and ZnO nanorod based sensors for chemical and bio-applications[J]. ECS Transactions, 2008, 13(3): 53-63.
- [6] 聂宇婷. 新型氧化锌(ZnO)纳米结构的合成生长机理和光学性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
NIE Y T. Synthesis and Optical Property of Novel ZnO Nanostructures[D]. Suzhou: Soochow University, 2013. (in Chinese)
- [7] 刘红霞. ZnO 基半导体材料的制备及其特性[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2000.
LIU H X. Preparation and Characteristics of ZnO-Based Semiconductor Materials[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)
- [8] HENNI A, MERROUCHE A, TELLI L, et al. Effect of potential on the early stages of nucleation and properties of the electrochemically synthesized ZnO nanorods[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, 31: 380-385.
- [9] BAO R R, WANG C F, PENG Z C, et al. Light-emission enhancement in a flexible and size-controllable ZnO nanowire/organic light-emitting diode array by the piezoelectric effect[J]. ACS Photonics, 2017, 4(6): 1344-1349.
- [10] DOGAR S, KHAN W, KIM S D. Ultraviolet photoresponse of ZnO nanostructured AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2016, 44: 71-77.
- [11] 顾鹏. 基于氧化锌纳米材料的高性能光电探测器研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2019.
- [12] BIONDO S, LAZAR M, OTTAVIANI L, et al. 4H-silicon carbide thin junction based ultraviolet photodetectors[J]. Thin Solid Films, 2012, 522: 17-19.
- [13] KHAN F, KHAN W, KIM S D. High-performance ultraviolet light detection using nano-scale-fin isolation AlGaIn/GaN heterostructures with ZnO nanorods[J]. Nanomaterials, 2019, 9(3): 440.
- [14] LI R H, Fei W X, TANG R. Investigation on threshold voltage of p-channel GaN MOSFETs based on p-GaN/AlGaIn/GaN heterostructure[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(8): 560-564.
- [15] ABDULSALAM A, DUTTA G. On the threshold voltage of normally-OFF AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors (HFETs) with p-(Al)GaIn gate[J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 35(1): 015020.
- [16] 李江江, 高志远, 薛晓玮, 等. 片上制备横向结构 ZnO 纳米线阵列紫外探测器件[J]. 物理学报, 2016, 65(11): 118104.
LI J J, GAO Z Y, XUE X W, et al. On-chip fabrication of lateral growth ZnO nanowire array UV sensor[J]. Acta

- Physica Sinica, 2016, 65(11): 118104. (in Chinese)
- [17] 方向明, 范怀云, 高世勇, 等. ZnO 纳米棒的制备及紫外探测性能[J]. 发光学报, 2018, 39(3): 369-374.
FANG X M, FAN H Y, GAO S Y, et al. Fabrication and ultraviolet detection of ZnO nanorods[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(3): 369-374. (in Chinese)
- [18] 商世广, 高浪, 任卫, 等. ZnO 纳米墙的电化学沉积法制备及紫外探测性能分析[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 103-109.
SHANG S G, GAO L, REN W, et al. Fabrication of ZnO nanowalls by electrochemical deposition and ultraviolet detection performance[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 103-109. (in Chinese)
- [19] 陈诗哲, 魏珂, 霍荡荡, 等. 基于 AlGaIn/GaN HEMT 的源漏整体刻蚀欧姆接触结构[J]. 半导体技术, 2017, 42(7): 521-525, 550.
CHEN S Z, WEI K, HUO D D, et al. Recess ohmic contact structure based on AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Semiconductor Technology, 2017, 42(7): 521-525, 550. (in Chinese)
- [20] QIAO D, YU L S, JIA L, et al. Transport properties of the advancing interface ohmic contact to AlGaIn/GaN heterostructures[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(6): 992-994.
- [21] 朱彦旭, 杨壮, 李赟龙, 等. 一种感光栅 GaN 基高电子迁移率晶体管紫外探测器[J]. 半导体光电, 2021, 42(1): 20-24.
ZHU Y X, YANG Z, LI L L, et al. Study on GaN-based high electron mobility transistor ultraviolet detector[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(1): 20-24. (in Chinese)
- [22] 祁晓萌 彭文博 赵小龙, 等. 基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器[J]. 物理学报, 2015, 64(19): 198501.
QI X M, PENG W B, ZHAO X L, et al. Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(19): 198501. (in Chinese)



谭张杨 女, 1998 年 9 月出生于湖北省荆州市, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为 GaN HEMT 紫外探测.



王晓冬(通讯作者) 男, 1977 年 11 月出生于河北省保定市, 现为中国人民警察大学副教授, 主要研究方向为 MEMS 力学传感器的设计.

E-mail: wangxiaodongfy@163.com

作者简介



朱彦旭 男, 1970 年 1 月出生于河北省秦皇岛市, 现为北京工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 GaN HEMT 器件、发光二极管、激光器、太阳能电池等半导体器件.