

文章编号: 0253-2239(2009)12-3515-04

GaN 基 512 × 1 元紫外长线列焦平面探测器组件

张 燕 储开慧 邵秀梅 袁永刚 刘大福 陈新禹 李向阳

(中国科学院上海技术物理研究所, 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要 介绍了 GaN 基 512 × 1 元紫外长线列焦平面探测器组件的研制过程, 并给出了器件的性能。利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法生长的多层 AlGaIn 外延材料, 通过刻蚀、钝化、欧姆接触电极制备等工艺, 制作了 256 × 1 的背照射 AlGaIn 紫外探测芯片。并对该芯片进行了 I - V 特性、响应光谱等测试, 得到芯片的暗电流 I_a 为 4.22×10^{-12} A、零压电阻 R_0 为 1.01×10^{10} Ω , 响应波段为 305~365 nm, 响应率约为 0.12 A/W。该 AlGaIn 探测芯片与电容反馈互阻抗放大器(CTIA)结构的读出电路互连成为一个 256 模块, 两个 256 模块经过拼接、封装后制备出 512 × 1 元紫外长线列焦平面探测器组件。测量室温(300 K)时焦平面组件(实际 524 元)的响应, 平均电压响应率为 1.8×10^8 V/W, 其盲元率为 9.0%, 响应不均匀性为 17.8%, 359 nm 处的平均波段探测率为 7×10^{10} cmHz^{1/2} W⁻¹。并对器件性能进行了分析。

关键词 紫外探测器; 512 元长线列; 工艺; GaN 基; 响应率

中图分类号 TN23; TN304.2⁺6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3515

GaN-based 512 × 1 Ultraviolet linear Focal Plane Arrays

Zhang Yan Chu Kaihui Shao Xiumei Yuan Yonggang Liu Dafu

Chen Xinyu Li Xiangyang

(State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The fabrication and characterization of GaN-based 512 × 1 ultraviolet linear photodetector are reported in this work. AlGaIn multilayers are grown in wetel-organic chemical vapor deposition (MOCVD). Material etching, passivation, metal contact and other techniques are used in the manufacture of 256 × 1 back-illuminated AlGaIn detector. The current-voltage (I - V) curve shows that current at zero bias is 4.22×10^{-12} A and resistance is 1.01×10^{10} Ω . A flat band spectral response is achieved in the 305~365 nm. The detector displays an unbiased responsivity of 0.12 A/W at 359 nm. This detector is bonded to a readout circuit with capacitive feedback transimpedance amplifier (CTIA) structure. Two modules are put together to form 512 linear ultraviolet focal plane arrays (FPA). The FPA is measured in 300 K and achieved average voltage responsivity 1.8×10^8 V/W, the blind rate 9.0% and the response nonuniformities 17.8%. The measurement of signal and noise led to a detectivity of 7×10^{10} cmHz^{1/2} W⁻¹ at 359 nm.

Key words ultraviolet detector; 512 linear; technology; GaN-based; responsibility

1 引 言

随着氮化镓(GaN)基材料生长技术在发光领域的突破, GaN 基紫外探测器的发展受到关注。在高质量材料的生长、器件工艺等领域都吸引了众多的研究人员, 氮化镓(GaN)基宽禁带半导体制备的探测器成为第三代的紫外探测器。GaN 基紫外探测

器具有量子效率高、响应截止锐利可调、可见/红外背景抑制、暗电流低等特点, 在油污探测、导弹羽焰探测、指纹识别、天文等方面都有重要应用, 可以大大降低虚警率, 提高探测分辨能力。

2002 年, J. P. LONG 等^[1]报道了 320 × 256 可见盲(300 nm~365 nm)的 AlGaIn p-i-n 焦平面阵列

收稿日期: 2008-10-21; **收到修改稿日期**: 2008-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(60807037, 60708028)和中国科学院知识创新工程青年人才领域关键项目资助课题。

作者简介: 张 燕(1975—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事紫外和红外探测器等方面的研究。

E-mail: zhangyan@mail.sitp.ac.cn

器件,2005年美国西北大学的 R. McClintock 等^[2]报道了 320×256 AlGaN 日盲型焦平面阵列器件,并对人像实现了成像。国内在 2008 年也报道了 128×128 日盲紫外探测器^[3]。

与面阵相比,线列探测器通过拼接可以在一维方向上得到尽可能多的探测元数,用于推扫/摆扫成像系统,可以实现高地面分辨率的空间对地观测应用。然而,国内外均未见有长线列紫外探测器的报道。

本文针对 512 元长线列探测器,从器件结构、材料生长、器件工艺、拼接与封装等方面介绍了器件的研制过程,并对制备的 512 元 GaN 基紫外长线列探测器进行了性能测试分析。

2 AlGaN 芯片研制

2.1 芯片结构设计

AlGaN 芯片结构设计如图 1 所示。芯片采用背照射结构,光从宝石衬底一侧入射。这种结构利用芯片与读出电路互连,适于制备大规模器件,可以实现大规模的混成焦平面器件。由于芯片采用背照射结构,AlN 作为缓冲层。

采用 p-i-n 结构实现对光生载流子的收集和输出。通过调整 p, i, n 各层的组分,得到芯片需要的响应波段。p-GaN, i-GaN, n-Al_{0.33}Ga_{0.67}N 各层的禁带宽度分别为 3.4 eV, 3.4 eV, 4.1 eV, 响应波段设计为 302~365 nm。其中, n-Al_{0.33}Ga_{0.67}N 作为窗口层,大于其禁带宽度 4.1 eV 的光子被吸收,只有小于 4.1 eV 的入射光子可以穿过 n-Al_{0.33}Ga_{0.67}N 到达 p-i-n 结区,因此 n-Al_{0.33}Ga_{0.67}N 决定了芯片响应的短波截止; i 型 GaN 层是主要的光吸收区,产生的光生载流子在 p, n 层形成的内建电场中定向移动形成光电流。

2.2 材料生长与测试

材料采用 MOCVD 方法在 Aixtron 2400G3HT 系统生长而成。与分子束外延(MBE)生长的结相比, MOCVD 生长的外延结构的漏电流密度较低^[4]。工作状态为:三甲基铝(TMA1)、三甲基镓(TMGa)、氨气和硅烷分别为 Al 源、Ga 源、N 源和 n 型掺杂源,载气采用氢气和氮气的混和气体。在双面抛光的蓝宝石衬底上生长 AlN 缓冲层。通过两步生长法调整缓冲层结构^[5],改善 AlN 生长状况,提高材料的整体晶体质量。之上依次生长 n-Al_{0.33}Ga_{0.67}N, i-GaN, p-GaN 层。其中, n-Al_{0.33}Ga_{0.67}N 为 Si 掺杂,电子浓度约为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 700 nm; i-GaN 层厚度为 180 nm; p-GaN 层为 Mg 掺杂,掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,厚

度为 150 nm。

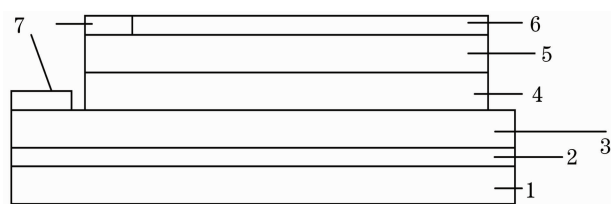


图 1 背照射 GaN 基探测器结构(1 宝石衬底、2 AlN 缓冲层、3 n-AlGaN、4 i-GaN、5 p-GaN、6 SiO₂、7 Au 电极)

Fig. 1 the structure of back-illuminated GaN-based detector (1 sapphire substrate; 2 AlN buffer layer; 3 n-AlGaN; 4 i-GaN; 5 p-GaN; 6 SiO₂; 7 Au electrode)

与单元或小规模阵列相比,长线列芯片对材料均匀性的要求很高。材料晶体质量的好坏与材料的均匀性将严重影响焦平面器件的均匀性等器件性能。因此材料的测试和筛选非常重要,选择晶体质量和均匀性相对较好的材料,进行芯片研制。材料筛选主要通过:1)透射光谱的测量,从材料的透射光谱分析界面状态等性质^[6];2)二维透射谱测试,掌握材料的均匀性。

2.3 芯片工艺

芯片研制包括表面清洗、电极生长、刻蚀、钝化等工艺。表面处理是芯片研制中的重要一环,特别是对于小工艺尺寸要求的较大规模线列芯片。采用化学清洗^[7]和等离子处理^[8]两种方法去除表面污染物,提高电极接触水平。有机污染物的处理主要通过三氯甲烷-丙酮-无水乙醇进行清洗,表面的氧化物利用酒精基盐酸进行处理。

欧姆接触的良好实现是决定器件性能的重要因素。对于宽禁带的 GaN 材料,欧姆接触的形成比较困难。通过选择合适的接触金属组合以及最佳的退火条件,可以形成欧姆接触。采用电子束蒸发设备制备电极。以 Ti/Al/Ni/Au 复合金属作为 n 型电极, Ni/Au 复合金属作为 p 型电极,经过一定温度的快速热退火,形成良好的欧姆接触^[9]。其中, p 电极退火温度为 550 °C,退火 3 min; n 电极退火温度为 650 °C,退火 40 s。

GaN 基材料的刻蚀采用离子束外延(IBE)干法刻蚀加 KOH 溶液的湿法腐蚀工艺,以减小刻蚀带来的表面和侧面损伤,降低暗电流^[10]。

2.4 芯片测试分析

对线列芯片进行室温 *I-V*、响应光谱测试。*I-V* 测试采用计算机控制的 KEITHLEY 236 电流/电压源。

单个光敏元的 I - V 测试结果见图 2 所示。测试曲线表明,芯片具有良好的结特性,零偏暗电流和反向漏电流都比较小,暗电流 I_d 达到 4.22×10^{-12} A。动态

零压电阻 R_0 为 $1.01 \times 10^{10} \Omega$;芯片单元面积为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,得到优值因子 $R_0 A$ 为 $2.5 \times 10^5 \Omega\text{cm}^2$ 。

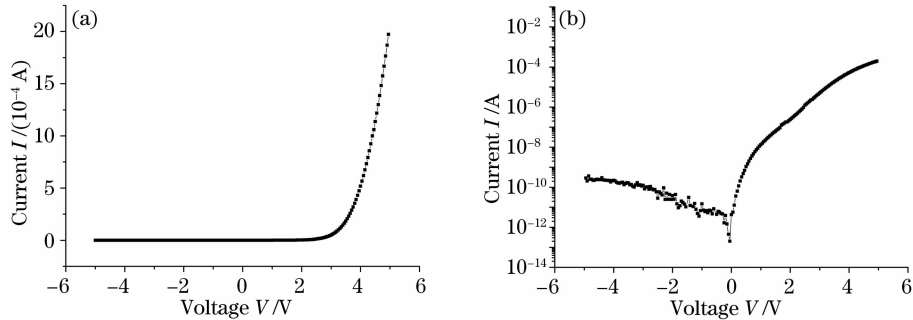


图 2 芯片的 I - V 曲线[以线性表示,(b)为相同数据的指数表示]

Fig. 2 I - V curve of the detector shown in linear scale. (b) data in logarithmic scale

器件响应光谱测试采用氙灯作紫外光源,经光栅单色仪分光后,照射到器件上。器件的光生电流经 Stanford SR570 电流放大器放大后,由 VC98 数字万用表采集。单色仪的控制和数据的采集均通过 RS232 接口由计算机自动完成。光源强度的标定采用紫外增强的 Si 光电二极管。图 3 为室温零偏压下单个光敏元的响应光谱曲线。50%截止计算的紫外响应波段为 305 nm~365 nm,截止边陡峭,形成“几”字形。在 359 nm 波长的电流响应率在 0.12 A/W,外量子效率为 41%。由于宝石衬底有一定的透过率,以 80% 透过计算,量子效率达到 51%。

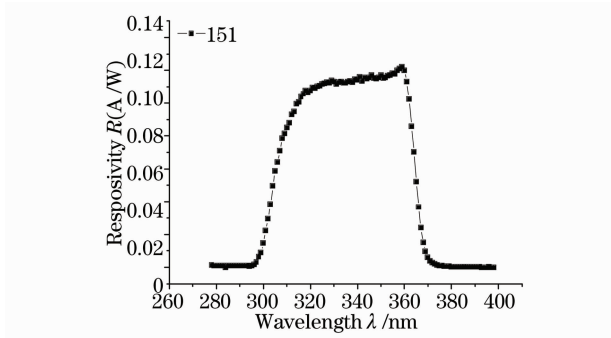


图 3 芯片响应光谱曲线

Fig. 3 Optical responsivity of the detector

对于 GaN 基 p-i-N 器件,背景产生的散粒噪声很小,芯片噪声主要由热噪声决定。因此,探测率 D_λ^* 为

$$D_\lambda^* = \frac{R_\lambda}{N} = \left(\frac{q\eta\lambda}{hc} \right) / \left(\frac{4kT}{R_0 A} + 2q\eta\Phi_b \right)^{1/2} \approx \left(\frac{q\eta\lambda}{hc} \right) / \left(\frac{4kT}{R_0 A} \right)^{1/2}$$

计算得到,芯片单个光敏元的探测率达到 $2.6 \times$

$10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 。

3 读出电路设计与焦平面研制

256 元(实际 262 元)长线列芯片采用背照射探测结构,与读出电路通过电极板间接互连。读出电路的输入级采用 CTIA 结构。CTIA 方式具有探测器零偏工作,电路噪声低,输入阻抗高等一系列优点。电路同时采用相关双采样(CDS)技术,两路采样输出 V_{01}, V_{02} ,输出的差分为最终输出信号,扫描结束后给出嵌入式操作(EOS)信号。

线列芯片与电路互连后成为一个 256 模块,将两个 256 模块进行无盲元拼接,制备成 512 元长线列 GaN 基紫外探测器,并安装于管壳中。制备成的焦平面器件,照片见图 4 所示。

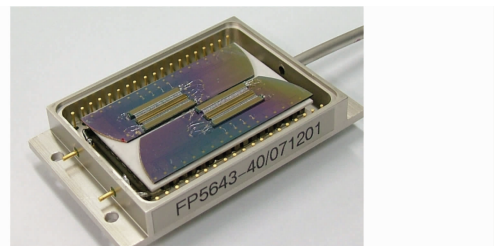


图 4 紫外焦平面器件照片

Fig. 4 Photo graph of the UV FPA

4 焦平面测试分析

焦平面测试以氙灯作为光源,光束经积分球进行均匀化处理,照射到样品上,光源用热释电器件进行定标。进行室温(300 K)性能测试,测试结果如图 5 所示(实际线列长度 524 元)。图中 Signal 表示 524 个光敏元的响应信号。经计算得到:盲元率为 9.0%,平均电压响应率为 $1.8 \times 10^8 \text{V/W}$ (除去盲

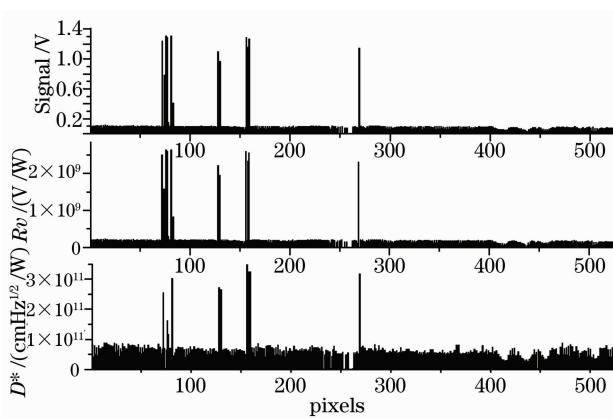


图 5 512×1 焦平面测试结果

Fig. 5 the measurement of 512×1 FPA

元), 响应不均匀性为 17.8%, 359 nm 处的平均波段探测率为 $7 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。与芯片探测率相比, 焦平面的探测率比较低, 这主要是受电路噪声的影响。由于芯片噪声小, 焦平面的噪声主要由电路噪声决定。因此通过合理的电路设计, 降低电路噪声, 或者采用雪崩光电二极管 (APD) 芯片结构提高信号增益, 将有助于提高焦平面器件的性能。

图 6 所示为 524 个光敏元的电压响应直方图。可见, 89.5% 的光敏元的电压响应集中在 $9 \times 10^7 \text{ V/W}$ 到 $2.1 \times 10^8 \text{ V/W}$ 之间, 在 $2.1 \times 10^8 \text{ V/W}$ 到 $2.7 \times 10^8 \text{ V/W}$ 之间有 1.5% 的光敏元; 还有 6.5% 的光敏元响应小于 $9 \times 10^7 \text{ V/W}$, 2.5% 的光敏元响应超过 $2.7 \times 10^8 \text{ V/W}$ 。这些响应较高和较低的光敏元影响了整个探测器组件的盲元率和不均匀性。原因主要有: 1) 材料的局部缺陷引起, 由于采用的外延材料上有一些小的异常点, 尺寸在几十微米量级, 如果某个光敏元正巧位于异常点处, 就会影响信号大小, 甚至于成为响应很小的“死像元”; 2) 芯片的刻蚀钝化工艺, 工艺中可能存在侧面漏电和钝

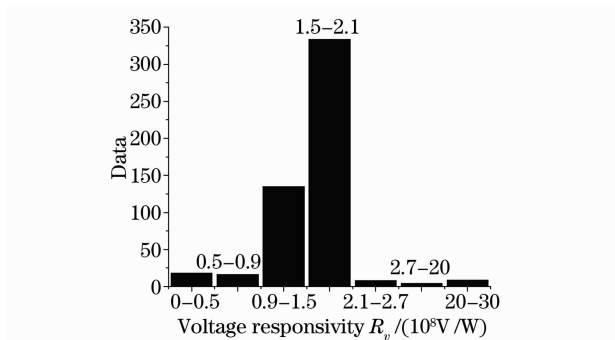


图 6 电压响应直方图

Fig. 6 Histogram of the voltage responsivity

化效果的不一致性, 导致部分光敏元响应偏离平均值较大; 3) 芯片与电路通过钢柱倒焊互连, 钢柱状况的不一致性导致某些元互连接触不良, 影响部分光敏元的响应; 4) 读出电路中的电容、增益和偏压等的不均匀性, 以及测试光源的不均匀性也会有影响。

5 结 论

利用 MOCVD 方法生长多层 AlGaIn 外延材料, 通过刻蚀、钝化、欧姆接触电极制备等工艺, 制备出 256×1 的背照射 AlGaIn 紫外探测芯片。芯片与 CTIA 结构的读出电路互连, 经拼接、封装后制备出 512×1 的长线列紫外焦平面探测器组件。对该焦平面进行了性能测试, 并对影响器件不均匀性的原因进行了分析。

参 考 文 献

- 1 J. P. Long, S. Varadaraajan, J. Matthews *et al.*. UV detectors and focal plane array imagers based on AlGaIn p-i-n photodiodes [J]. *Opto-Electronics Review*, 2002, **10**(4): 251~260
- 2 R. McClintock, K. Mayes, A. Yasan *et al.*. 320×256 solar-blind focal plane arrays based on $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(1): 011117
- 3 Yuan YongGang, Zhang Yan, Chu KaiHui *et al.*. Development of solar-blind AlGaIn 128×128 Ultraviolet Focal Plane Arrays [J]. *Science in China*, 2008, **51**(6): 820~826
- 4 M. B. Reine, A. Hairston, P. Lamarre *et al.*. Solar-blind AlGaIn 256×256 p-i-n detectors and focal plane arrays [J]. *SPIE*, 2006, **6121**: 236~250
- 5 J. F. Yan, L. W. Guo, J. Zhang *et al.*. Characteristics of the improved a-plane GaN films grown on r-plane sapphire with two-step AlN buffer layer [J]. *J. Cryst. Growth.*, 2007, **307**(1): 35~39
- 6 Xu Jintong, Research and fabrication of GaN-based avalanche photodiodes [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006
许金通. 氮化镓基雪崩光电二极管的研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2006
- 7 Jingxi Sun, K. A. Richert, J. M. Redwing *et al.*. p-GaN surface treatments for metal contacts [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(4): 415~417
- 8 Yingwen Tang, Da You, Jintong Xu *et al.*. Reduction of ohmic contact resistivity on p-GaN using N_2 plasma surface treatment at room temperature [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2006, **21**: 1597~1599
- 9 Wang Lin, Xu Jintong, Chen Jun *et al.*. The Ohmic Contacts of high Al contents on N - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ materials [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(21): 967~970
王 玲, 许金通, 陈 俊等. 高 Al 组分 N - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料的欧姆接触 [J]. 激光与红外, 2007, **37**(21): 967~970
- 10 Chen Jie, Xu Jintong, Wang Ling *et al.*. Low-damage wet chemical etching for GaN-based visible-blind p-i-n detector [J]. *SPIE*, 2008, **6621**: 66211D