

AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管温度传感器特性*

刘旭阳 张贺秋[†] 李冰冰 刘俊 薛东阳 王恒山
梁红伟 夏晓川

(大连理工大学微电子学院, 大连 116024)

(2019年4月29日收到; 2019年12月8日收到修改稿)

本文制作了基于无栅 AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管结构的温度传感器, 并对其温度相关的电学特性进行了表征. 实验测试了器件从 50 °C 到 400 °C 的变温电流-电压特性, 研究了器件灵敏度随着器件沟道长宽比的变化, 并研究了在 300—500 °C 高温的空气和氮气中经过 1 h 恒温加热后器件的电学特性变化. 理论与实验研究结果表明, 随着器件沟道长宽比的增大, 器件的灵敏度会随之上升; 在固定电流 0.01 A 下, 器件电压随温度变化的平均灵敏度为 44.5 mV/°C. 同时, 稳定性实验显示器件具有较好的高温保持稳定性.

关键词: Ga_N, 高电子迁移率晶体管, 温度传感器, 灵敏度

PACS: 72.80.Ey, 73.61.Ey

DOI: 10.7498/aps.69.20190640

1 引言

温度传感器是应用最广泛的传感器之一. 随着科技的不断发展, 温度传感器在医学、工业、航空及民用领域都得到了广泛的应用. 与传统的温度传感器如热电阻、热电偶传感器相比, 半导体温度传感器具有灵敏度高、体积小、功耗低、抗干扰能力强等诸多优点, 无论输出信号是电压、电流还是频率, 在一定的温度范围内都可与温度成线性关系^[1].

然而在高温测量领域中, 使用传统的半导体材料制作的温度传感器已经逐渐不能满足社会对它的需求. 例如当涉及高热预算时, Si 的半导体特性会发生变化, 从而使得大部分 Si 基器件的工作温度不适合超过 150 °C^[2,3]. Ga_N 材料具有优良的特性: 大禁带宽度、高电子饱和速率和高击穿电场;

制作的器件具有良好的电学特性: 高击穿电压和低的漏电流等, 可以在高温、高压、高频与强辐照的环境中工作^[4,5]. Ga_N 基器件的工作温度可以达到 600 °C 以上, 这是传统 Si 材料器件无法比拟的. 而其他的一些半导体温度传感器相比, Ga_N 基高电子迁移率晶体管 (HEMT) 温度传感器的主要优势是由于高的二维电子气 (2DEG) 浓度和高的载流子迁移率^[6,7] 带来的高灵敏度. 由于近年来 Ga_N 基器件的快速发展, Ga_N 基 HEMT 温度传感器在航空航天、化学工业、矿物开采加工等领域也有着广泛的应用前景.

2014 年, Kwan 等^[8] 展示了利用单片集成的 Ga_N 器件得到了高度线性的温度-电压关系. 2016 年, Rao 等^[9] 设计并制造了一个基于 4H-SiC 的 p-i-n 二极管温度传感器, 测量温度高达 300 °C, 最大灵敏度为 2.66 mV/°C. 2017 年, Matthus 等^[10] 制造的 4H-SiC p-i-n 二极管具有 4.5 mV/°C 的极

* 国家自然科学基金 (批准号: ZX0180421, ZX20160406, 11975257) 和大连市科技计划 (批准号: ZX20180681) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hqzhang@dlut.edu.cn

高灵敏度, 测温范围为室温到 460 °C. 同年, Madhusoodhanan 等 [11] 制作了 GaN-on-SiC 异质结二极管并在室温到 400 °C 进行了测试, 灵敏度最高为 2.25 mV/°C. 2019 年, Pristavu 等 [12] 制备了 Ni/4H-SiC 肖特基二极管温度传感器, 并在室温到 450 °C 内进行了测试, 器件表现出了稳定的灵敏度 (最高 2.33 mV/°C) 和出色的线性度. 表 1 列出了近年来发表的一些高温半导体温度传感器的器件参数.

表 1 一些不同结构的半导体高温温度传感器
Table 1. Some semiconductor high temperature sensors in various structures.

文献	结构	灵敏度/ mV/°C	温度/°C
[8]	单片集成的 AlGaIn/GaN HEMT	0.38	25—250
[9]	4H-SiC p-i-n 二极管	2.66	20—300
[10]	4H-SiC p-i-n 二极管	4.5	25—460
[11]	GaN-on-SiC 异质结二极管	2.25	25—400
[12]	Ni/4H-SiC 肖特基二极管	2.33	25—450
本文工作	无栅 AlGaIn/GaN HEMT	44.5	50—400

本文设计并制造了无栅 AlGaIn/GaN HEMT 温度传感器, 并对其特性进行了表征, 这在目前发表的一些 GaN HEMT 器件相关的文章中是很少见的. 该器件由具有 GaN 帽层的 AlGaIn/GaN 异质结构材料制备而成. 文中给出了器件随温度变化的输出特性曲线, 并利用实验与理论分析相结合的方式给出了器件灵敏度随沟道长度的变化关系, 同时研究了器件的高温保持稳定性.

2 实验

2.1 材料的生长与器件的制备

实验中使用的 AlGaIn/GaN 异质结材料是在蓝宝石衬底上外延生长的, 外延层从下至上包括大于 1 μm 的 GaN 缓冲层, 大于 150 nm 的 GaN 沟道层, 20 nm 的 Al_{0.25}Ga_{0.75}N 层和 2.5 nm 的 GaN 帽层. 经室温下的霍尔测试得到: 外延片的方块电阻为 300 Ω/□, 2DEG 浓度为 1.4 × 10¹³ cm⁻², 霍尔迁移率为 1350 cm²/(V·s). 器件结构为无栅 HEMT 结构. 用热蒸发的方法制备了 Ti/Al/Ni/Au (20 nm/100 nm/50 nm/100 nm) 源漏电极, 电极形状为直径 0.8 mm 的圆形, 在 N₂ 氛围下 830 °C 退火 50 s 形成了欧姆接触. 器件结构示意图如下图 1 所示.

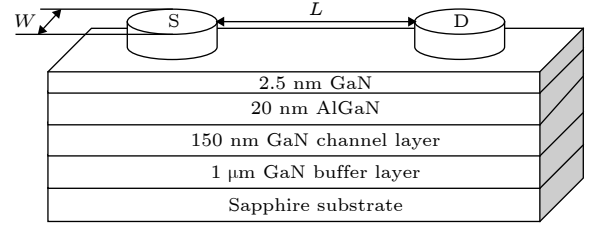


图 1 器件结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the device structure.

2.2 测试与表征

实验中利用 Keithley 2611 源表对器件的电学特性进行了测试. 使用 HP-1010 加热台为器件加热, 在 50—400 °C 范围内测试器件的变温电流-电压 (*I*-*V*) 特性. 在研究器件的高温保持稳定性过程中, 将器件在管式炉中分别加热到 300 °C, 400 °C, 500 °C 并保持 1 h, 比较了加热前后样品电学特性的变化.

3 结果与分析

3.1 HEMT 器件的电流电压特性与温度关系的理论模型

对 HEMT 器件, 在漏源之间施加电压后, 设沿沟道方向电势为 $V(x)$, 则有

$$en_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGaIn}}(m)}{d_{\text{AlGaIn}}(m, T)} (V_G - V_T(m, T) - V(x)), \quad (1)$$

其中 e 为电子电量, n_s 为 2DEG 的浓度, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_{AlGaIn} 为 AlGaIn 层的相对介电常数, m 为铝组分, T 为开氏温度, d_{AlGaIn} 为 AlGaIn 层的厚度, V_G 为栅压 (下文的计算中认为栅压为 0). 因此

$$I_{\text{DS}} = W\mu(T) \frac{dV(x)}{dx} \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGaIn}}(m)}{d_{\text{AlGaIn}}(m, T)} \times (V_G - V_T(m, T) - V(x)), \quad (2)$$

其中 μ 为 2DEG 的迁移率, V_T 阈值电压是一个与 m 和 T 有关的量, 对 (2) 式两端由源端向漏端积分, 即可得到

$$I_{\text{DS}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGaIn}}(m) \mu(T) W}{2L d_{\text{AlGaIn}}(m, T)} \times [2(V_G - V_T(m, T)) V_{\text{DS}} - V_{\text{DS}}^2] \quad (3)$$

其中 W 为沟道的宽度, 与电极的宽度一致, L 为沟道长度. 在线性区, 即 $V_{\text{DS}} \ll (V_G - V_T)$ 时, 可以简化为

$$I_{DS} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{AlGa}} \mu(T) W}{L d_{\text{AlGa}}(m, T)} (V_G - V_T(m, T)) V_{DS}, \quad (4)$$

即:

$$V_{DS} = \frac{L d_{\text{AlGa}}(m, T)}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{AlGa}} W \mu(T) (V_G - V_T(m, T))} I_{DS}. \quad (5)$$

在保持恒流的模式下, (5) 式两边对温度 T 求导, 即得到器件电压随温度变化的电压灵敏度的公式:

$$\frac{dV_{DS}}{dT} = \frac{I_{DS} L}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{AlGa}} W} \left(\frac{d_{\text{AlGa}}(m, T)}{\mu(T) (V_G - V_T(m, T))} \right)'. \quad (6)$$

因此, 在线性区, 铝组分固定的情况下, 器件的 I - V 特性变化主要与 μ , d , 以及 V_T 随温度的变化有关, 而其本质上就是由于 GaN 基材料禁带宽度以及 2DEG 的迁移率^[13] 与浓度随温度的变化. 温度升高过程中, 由于 AlGa 和 GaN 的热膨胀系数不同, 造成 AlGa 层势垒层应变能减小, 从而导致极化电荷面密度和极化电场减小, 对 2DEG 的限制作用降低. 此外, 随温度上升, 电子热激发能 ($K_b T$) 增大, 三角形势阱中的 2DEG 电子热激发到更高能态的几率增大, 2DEG 电子体系的量子特征也会减弱. 而迁移率则是由于极化库伦场散射在 AlGa/GaN HEMT 器件中所起的作用, 呈现出随温度的升高而下降的趋势^[14].

当器件在线性区时, 迁移率随温度的变化可以用下述公式来简单描述^[15]:

$$\mu_T = \mu_{300K} \left(\frac{T}{300} \right)^{-1.6}. \quad (7)$$

而阈值电压 V_T 随温度的变化则可以由下面公式计算^[15,16]:

$$V_T(T, m) = \varphi_B - \Delta E_c(T, m) - \frac{\sigma_{pz}(T, m) d_{\text{AlGa}}}{\varepsilon_{\text{AlGa}}(m)} - \frac{q N_d d_{\text{AlGa}}^2}{2 \varepsilon_{\text{AlGa}}(m)}, \quad (8)$$

$$\Delta E_c(T, m) = 0.75 (E_g^{\text{AlGa}}(T, m) - E_g^{\text{GaN}}(T, m)), \quad (9)$$

$$E_g^{\text{AlGa}}(T, m) = m E_g^{\text{AlN}}(T, m) + (1 - m) E_g^{\text{GaN}}(T) + m(1 - m), \quad (10)$$

$$E_g^{\text{AlN}}(T) = 6.34 - 1.799 \times 10^{-3} \times \frac{T^2}{T + 1462}, \quad (11)$$

$$E_g^{\text{GaN}}(T) = 3.582 - 9.09 \times 10^{-4} \times \frac{T^2}{T + 830}, \quad (12)$$

其中 μ_T 与 μ_{300K} 分别为温度 T 和 300 K 下

2DEG 的迁移率, φ_B 为肖特基势垒高度, ΔE_c 为 AlGa/GaN 界面处的导带差, σ_{pz} 为极化电荷面密度, N_d 为 AlGa 层的掺杂浓度, E_g^{AlGa} , E_g^{GaN} 和 E_g^{AlN} 分别为 AlGa, GaN 和 AlN 的禁带宽度.

利用上述模型对器件特性随温度变化进行了模拟计算, 考虑到材料的晶格常数随温度的变化较小 (小于千分之一)^[17], 因此计算中忽略了温度对 AlGa 层厚度以及极化电荷面密度的影响, 表 2 中为拟合中一些参数的设定. 图 2 为器件的理论模拟结果, 可以看出固定电流 (0.01 A) 的情况下, 器件两端电压随温度不是线性变化的, 而使用 E 指数拟合方法可以很好的对器件电压随温度的变化进行拟合.

表 2 拟合参数列表
Table 2. List of fitting parameters.

参数	μ_{300K}	$\varphi_B(m)$	N_d	$d_{\text{AlGa}}(m)$	$\varepsilon_{\text{AlGa}}(m)$
单位	$\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	eV	cm^{-3}	nm	ε_0
值	1100	$0.85+1.3m$	3×10^{17}	20	$10.4-0.3m$

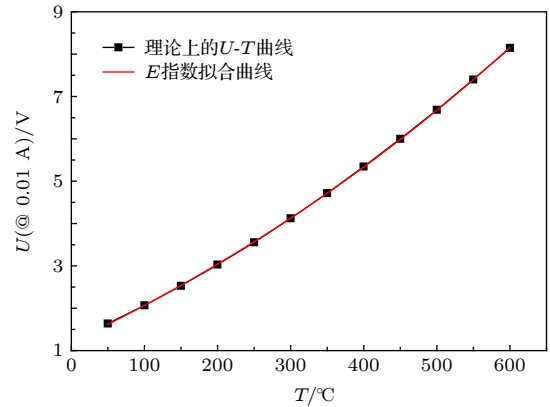


图 2 HEMT 器件两端电压在电流固定时随温度的变化
Fig. 2. The voltage change across the HEMT device with temperature when the current is fixed.

3.2 实验研究

图 3 显示了 HEMT 器件在 50—400 °C 范围内不同温度下的 I - V 特性曲线, 可以看出随着温度的升高, 漏电流随之逐渐降低, 这与相关文献中报导的结果相符^[18,19]. 为了获得更高的器件灵敏度, 也考虑到分立器件对于功耗没有十分严苛的要求, 固定电流选择了尽可能大的 0.01 A. 图 4 显示了器件在 0.01 A 时两端压降随温度的变化及 E 指数的拟合曲线, 由图中的数据可以计算得到拟合优度 R^2 ^[20] 以评估实验测量值与其拟合值之间的一致

性, E 指数方法拟合的拟合优度 R^2 为 0.992, 这也验证了前文理论推导的结果. 通过对电压-温度关系的 E 指数拟合曲线求导后再积分取均值计算得出, 器件的平均灵敏度为 $44.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

由 (6) 式可推知, 改变器件的 L/W 可以使器件的灵敏度随之变化, 随着 L/W 的增加, 器件的灵敏度也会随之增加, 而实验结果也证明了这一点. 如图 5 所示, HEMT 温度传感器沟道长度从 1.5 mm 增加为 2.3 mm 时, L/W 变为原来的 1.53 倍, 灵敏度也变为原来的 1.39 倍; 沟道长度从 2.3 mm 增加为 4.5 mm 时, L/W 变为原来的 1.96 倍, 灵敏度也变为原来的 1.59 倍.

本文还研究了器件的高温保持稳定性问题. 图 6 与图 7 分别显示了器件在 N_2 氛围和空气氛围中的高温保持稳定性, 分别测试了器件在 300°C , 400°C 和 500°C 下保持 1 h 后的 I - V 特性变化.

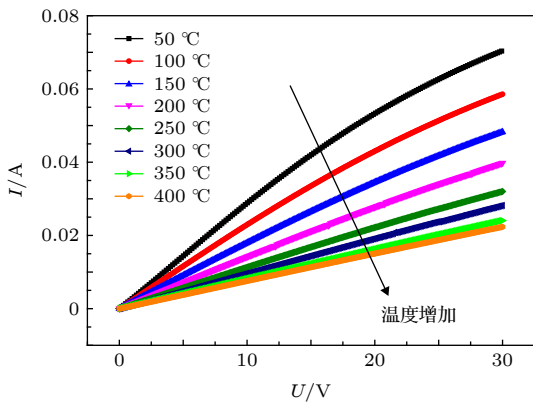


图 3 HEMT 器件在 $50\text{--}400^\circ\text{C}$ 下的 I - V 特性曲线
Fig. 3. I - V characteristic curve of HEMT device at $50\text{--}400^\circ\text{C}$.

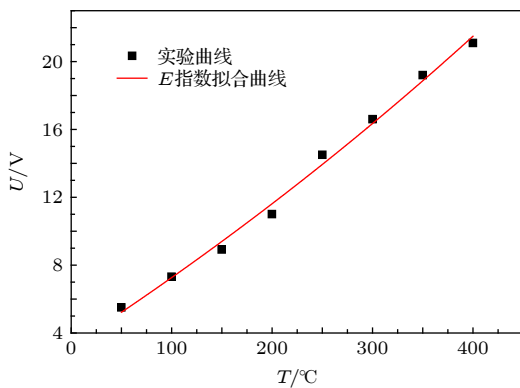


图 4 固定电流 (0.01 A) 下电压随温度的变化曲线与其拟合曲线
Fig. 4. Curve and fitting curve of voltage changes with temperature at fixed current (0.01 A).

可以看出器件在高温下保持 1 h 后电学特性的变化范围在 10% 以内, 器件具有较好的高温保持稳定性. 器件性能的变化可能是由于热载流子效应或是金属电极与材料的相互扩散引起的 [21,22], 具体的变化机制还需要进一步研究.

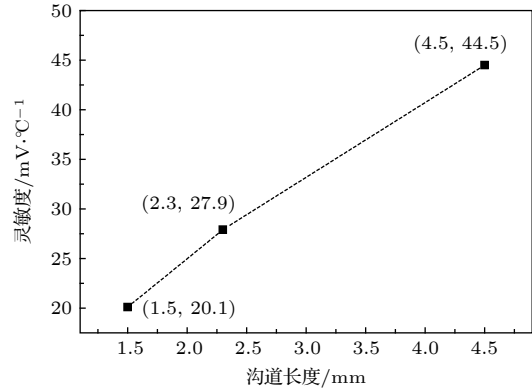


图 5 器件灵敏度随沟道长度的变化
Fig. 5. Device sensitivity as a function of channel length.

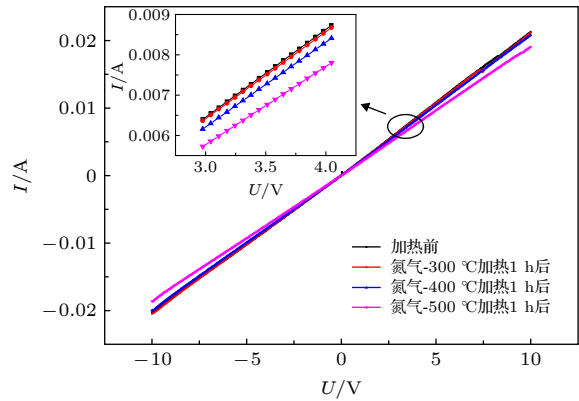


图 6 器件在 N_2 氛围中的高温保持稳定性
Fig. 6. Temperature stability of the device in N_2 atmosphere.

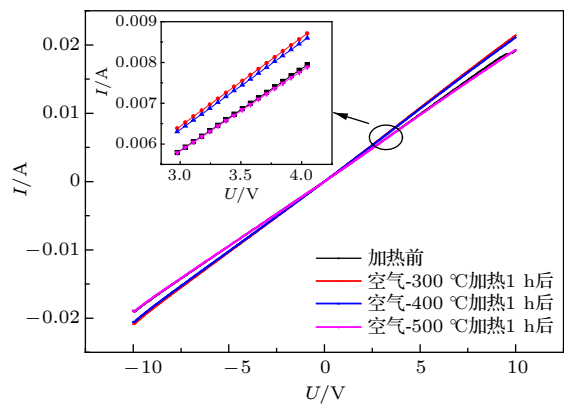


图 7 器件在空气氛围中的高温保持稳定性
Fig. 7. Temperature stability of the device in an air atmosphere.

4 结 论

使用热蒸发方法制备了无栅 AlGaIn/GaN HEMT 温度传感器并对器件的变温输出特性进行了测试. 实验显示器件在固定电流 0.01 A 时电压随温度的变化可以用 E 指数模型对其进行很好的拟合, 与理论分析结果相一致. 器件尺寸在 6.1 mm × 0.8 mm 时的灵敏度可以达到 44.5 mV/°C. 改变器件的沟道长宽比 L/W 可以对器件的灵敏度进行调整, 灵敏度会随着 L/W 的增加而增大. 器件长时间处在 300 °C 以上的高温空气和氮气氛围后电学特性变化不大, 具有较好的高温保持稳定性.

参考文献

- [1] Zhang X, Jin D M, Liu L T 2006 *Transd. Microsys. Technol.* **3** 1 (in Chinese) [张洵, 靳东明, 刘理天 2006 *传感器与微系统* **3** 1]
- [2] Rue B, Flandre D 2007 *Proceedings 2007 IEEE International SOI Conference* Indian Wells, CA, USA, Oct. 1–4, 2007 p111
- [3] de Souza M, Rue B, Flandre D, Pavanello M A 2009 *Proceedings 2009 IEEE International SOI Conference* Foster City, CA, USA, Oct 5–8, 2009 p1
- [4] Xie G, Edward X, Niloufar H, Zhang B, Fred Y F, Wai T N 2012 *Chin. Phys. B* **21** 086105
- [5] Duan B X, Yang Y T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 057302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂 2014 *物理学报* **63** 057302]
- [6] Ambacher O, Smart J, Shealy J R, Weimann N G, Chu K, Murphy M, Schaff W J, Eastman L F, Dimitrov R, Wittmer L, Stutzmann M, Rieger W, Hilsenbeck J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3222
- [7] Kong Y C, Zheng Y D, Zhou C H, Deng Y Z, Gu S L, Shen B, Zhang R, Han P, Jiang R L, Shi Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2320 (in Chinese) [孔月婵, 郑有料, 周春红, 邓永楨, 顾书林, 沈波, 张荣, 韩平, 江若琰, 施毅 2004 *物理学报* **53** 2320]
- [8] Kwan A M H, Guan Y, Liu X S, Chen K J 2014 *IEEE Trans. Electron Devices* **61** 2970
- [9] Rao S, Pangallo G, Della Corte F G 2016 *IEEE Trans. Electron Devices* **63** 414
- [10] Matthus C D, Erlbacher T, Hess A, Bauer A J, Frey L 2017 *IEEE Trans Electron Devices* **64** 3399
- [11] Madhusoodhanan S, Sandoval S, Zhao Y, Ware M E, Chen Z 2017 *IEEE Electr Device Lett.* **38** 1105
- [12] Pristavu G, Brezeanu G, Pascu R, Draghici F, Badila M 2019 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **94** 64
- [13] Gu J, Wang Q, Lu H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 077107 (in Chinese) [顾江, 王强, 鲁宏 2011 *物理学报* **60** 077107]
- [14] Liu Y 2017 *Ph. D. Dissertation* (Jinan: Shandong University) (in Chinese) [刘艳 2017 博士学位论文 (济南: 山东大学)]
- [15] Huque M A, Eliza S A, Rahman T, Huq H F, Islam S K 2009 *Solid State Electron.* **53** 341
- [16] Yahyazadeh R, Hashempour Z 2010 *27th International Conference on Microelectronics (MIEL 2010)* Nis, Serbia, May 16–19, 2010 p189
- [17] Iwanaga H, Kunishige A, Takeuchi S 2000 *J. Mater. Sci.* **35** 2451
- [18] Akita M, Kishimoto S, Mizutani T 2001 *IEEE Electron Device Lett.* **22** 376
- [19] Chang Y C, Tong K Y, Surya C 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** 188
- [20] Nagelkerke N J D 1991 *Biometrika* **78** 691
- [21] Ren J 2017 *Ph. D. Dissertation* (Wuxi: Jiangnan University) (in Chinese) [任舰 2017 博士学位论文 (无锡: 江南大学)]
- [22] Chen W W 2016 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [陈伟伟 2016 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]

Characteristics of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor temperature sensor^{*}

Liu Xu-Yang Zhang He-Qiu[†] Li Bing-Bing Liu Jun Xue Dong-Yang
Wang Heng-Shan Liang Hong-Wei Xia Xiao-Chuan

(*School of Microelectronics, Dalian University of Technology, DaLian 116024, China*)

(Received 29 April 2019; revised manuscript received 8 December 2019)

Abstract

Semiconductor temperature sensors have been widely used in medical, industrial, aviation and civil fields due to their advantages such as high sensitivity, small size, low power consumption and strong anti-interference ability. However, most Si-based temperature sensors are not suitable for the application in high-temperature environments. The new AlGa_N/Ga_N heterojunction material not only has a wide band gap, but also has a high two-dimensional electron gas concentration and carrier mobility. Therefore, the device made with it not only has good electrical properties, but also can be applied in ultra-high environments. In this paper, a temperature sensor based on gateless AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor structure was fabricated and its temperature-dependent electrical properties were characterized. The temperature dependence of current-voltage characteristics of the device were tested from 50 to 400 °C. The sensitivity of the device was studied as a function of the channel aspect ratio of the device. The stability of electrical properties was characterized after heating in air and nitrogen at 300—500 °C for 1 hour. The theoretical and experimental results show that as the aspect ratio of the device increases, the sensitivity of the device increases. At a fixed current of 0.01 A, the average sensitivity of the device voltage with temperature changes is 44.5 mV/°C. Meanwhile, the good high temperature retention stability is shown during stability experiments.

Keywords: Ga_N, high electron mobility transistor, temperature sensor, sensitivity

PACS: 72.80.Ey, 73.61.Ey

DOI: [10.7498/aps.69.20190640](https://doi.org/10.7498/aps.69.20190640)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. ZX0180421, ZX20160406, 11975257) and Science and Technology Planning Project of Dalian, China (Grant No. ZX20180681).

[†] Corresponding author. E-mail: hqzhang@dlut.edu.cn