

1 200 V 4H-SiC 结势垒肖特基二极管温度特性研究

袁昊¹, 宋庆文², 汤晓燕¹, 元磊¹, 张义门¹, 张玉明¹

(1. 西安电子科技大学微电子学院, 陕西 西安 710071; 2. 西安电子科技大学先进材料与纳米科技学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为了更好地研究温度对碳化硅结势垒肖特基二极管 (SiC JBS) 静态电学参数的影响, 我们成功制备了 1.2 kV SiC JBS 并对其在 25 °C ~ 150 °C 温度范围内的静态 I - V 特性进行了研究。结果显示, 常温工况下, 所制器件在偏压为 1.5 V 时的正向电流可以达到 5 A, 而反向击穿电压高于 1 300 V, 具有良好的正、反向静态特性; 高温工况下 (150 °C), 所制器件可以正常工作。随着温度的升高, 器件的肖特基势垒高度及理想因子基本保持不变, 具有良好的稳定性。正向工作时, 由于材料迁移率的下降, 器件导通电阻随着温度的升高而不断增大 (为正温度系数); 反向工作时, 击穿电压没有随着温度的升高而退化, 漏电流则随着温度的升高而不断上升, 低压时 150 °C 状态下漏电流相较于常温状态的上升了 1.5 个数量级, 而高压时同样情况下仅上升了 1 个数量级, 符合雪崩击穿机制。

关键词: 4H-SiC; JBS; 温度特性中图分类号: TN304.2⁺4

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2016)05-0059-03

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2016.05.012

Research on the Temperature Characteristics of 1 200 V 4H-SiC Junction Barrier Schottky Diode

YUAN Hao¹, SONG Qingwen², TANG Xiaoyan¹, YUAN Lei¹, ZHANG Yimen¹, ZHANG Yuming¹

(1. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Advanced Materials and Nanotechnology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In order to research the effect of temperature on static electrical parameters of 4H-SiC junction barrier Schottky (JBS) diode, 1.2 kV 4H-SiC JBS diodes were fabricated and their current-voltage characteristics were measured in the range of 25 °C ~ 150 °C. The results illustrate the forward current is 5 A at room temperature with forward voltage drop of 1.5 V and its breakdown voltage can reach to 1 300 V at least, illustrate a good static I - V characteristic. Meanwhile, the fabricated device can work normally under high temperature (150 °C), and the schottky height and ideal factor remain unchanged with temperature increasing, thus it has good stability. However, its on-resistance increases with temperature rising due to the decreasing of mobility of carrier, which shows positive temperature coefficient. At reverse bias, breakdown voltage does not degrade as temperature rising. Reverse leakage current rises by almost 1.5 orders of magnitude at low reverse voltage comparing to the reverse leakage current at room temperature and rises by only 1 order of magnitude at high reverse voltage with temperature increasing, which is in accord with avalanche breakdown mechanism.

Keywords: 4H-SiC; JBS; temperature characteristic

0 引言

SiC 材料作为第三代半导体的代表, 以其禁带宽度宽、击穿电场强度高、电子饱和速度快及键合稳定等优

收稿日期: 2016-04-30

作者简介: 袁昊 (1989-), 男, 在读博士研究生, 主要从事 SiC 功率器件的研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61404098, 61176070 及 61274079); 国家教育部博士点专项基金 (20110203110010, 20130203120017); 国家重点基础研究计划 (2015CB759600); 中国教育部重点项目 (625010101)

良特性, 已成为新一代高功率器件的首选材料。相比于 Si 肖特基势垒二极管 (SBD), SiC SBD 具有更大的耐压能力、更小的漏电流以及更快的开关速度, 是最先得到商业应用的 SiC 器件^[1]。SBD 反向漏电流大, 而结势垒肖特基二极管 (JBS) 结合了 PIN 二极管反向漏电流较小及 SBD 导通电阻较低^[2-4] 的优势。

对器件而言, 温度特性至关重要, 目前已有很多研究团队报道了 SiC 器件的温度特性^[5-7]。在高温下, SiC JBS

的电学特性会发生一些变化。为了更好地研究温度对 SiC JBS 静态电学参数的影响,我们在实验室制备了 1.2 kV 4H-SiC JBS 器件并对其进行了全温度范围的性能研究。

1 器件结构及制备

本次实验所制的 1.2 kV SiC JBS 器件的剖面如图 1 所示。其外延片掺杂浓度和厚度分别为 $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 。

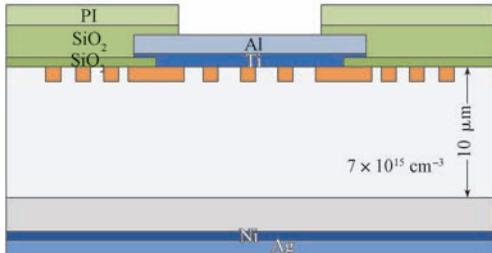


图 1 SiC JBS 横截面示意

Fig. 1 Schematic diagram of the SiC JBS cross-section
该器件的具体制作工艺步骤如下:

(1) 外延片经过清洗后,首先形成对准标记,之后通过注入 Al 离子形成 P+ 源区及场限环终端区(注入的剂量为 $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 到 $1.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 能量为 80 keV 到 350 keV), 其中终端采用非均匀场线环终端设计,通过优化仿真,击穿电压可以达到 1 450 V。

(2) 将 PECVD(等离子体增强化学气相沉积) SiO₂ 层作为器件的场氧区域,利用 200 nm Ni 金属在 1 000 °C 真空环境下退火 3 min,形成背面的欧姆接触。

(3) 采用溅射方式制备正面的 Ti 金属肖特基接触。

(4) 对正、反两面的金属进行加厚,并利用第二层钝化 SiO₂ 层和聚酰亚胺使正面电极以外的区域与外界隔离。

2 温度特性测试

利用 Agilent 1505B 半导体分析仪对所制备的 1.2 kV SiC JBS 进行静态 I - V 特性测试。

2.1 正向 I - V 特性

所测的 SiC JBS 器件的正向 I - V 特性随温度变化的趋势如图 2 所示。可以看到,常温下,其开启电压约为

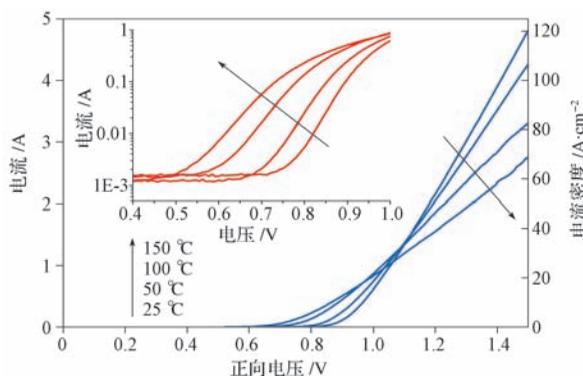


图 2 所制 SiC 器件的静态正向 I - V 特性

Fig. 2 Static forward I - V characteristic of the SiC device

0.8 V, 正向电流在 1.5 V 时可达 5 A; 开启电压随着温度的上升而降低,从常温下的 0.8 V 下降到 150 °C 下的 0.6 V, 具有负温度系数。

正向偏置情况下,流过肖特基接触界面的电流可以描述为

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中: I_s ——饱和电流密度,将 $\ln I$ 与 V 的直线关系曲线延伸到电压为零时得到的; n ——理想因子; q ——电子电荷量; k ——玻尔兹曼常数; T ——绝对温度。

式(1)中的 I_s 可以描述为

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2)$$

式中: ϕ_B ——零偏时的势垒高度; A ——器件的有源区面积; A^* ——理查德常数(对于 N 型 SiC 材料, $A^* = 146 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$)^[8]。

理想因子 n 与曲线的斜率有关,用于评估热电子发射机制在总导通机制的占比。当总电流全由发射的热电子组成时, $n=1$ 。 n 可由式(3)得出:

$$n = \frac{q}{kT} \frac{\partial V}{\partial \ln I} \quad (3)$$

利用式(1)~式(3),我们可以通过正向 I - V 曲线计算出其势垒高度及理想因子随温度的变化(图 3)。

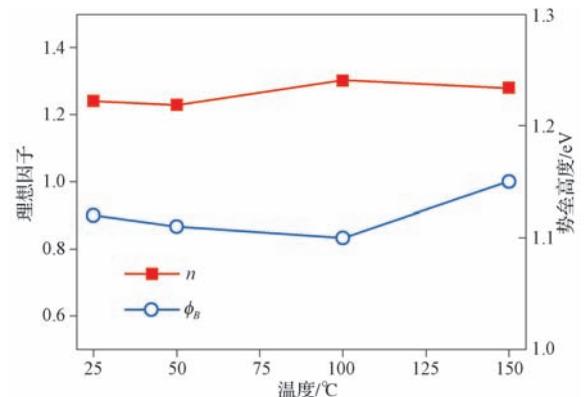


图 3 势垒高度和理想因子与温度的关系

Fig. 3 Relationship among Schottky barrier height, ideal factor and temperature

可以看到:

(1) 常温下,所制器件的势垒高度为 1.12 eV,接近金属 Ti 与 SiC 材料的理想势垒高度(1.2 eV); 其理想因子为 1.24, 小于 1.5, 说明其主要导电机理为热电子发射。

(2) 随着温度的上升,所制器件的势垒高度和理想因子均基本保持不变。势垒高度基本不变,说明器件的肖特基势垒高度正常,受非理想因素影响很小,开启电压减小的主要原因在于电子在高温下具有更大的能量,更容易越过势垒; 理想因子保持不变,则说明其导

电机制在高温下没有发生变化。

(3) 开启后, 电流随着温度的升高而降低, 对应的导通电阻增大, 从常温下的 $4.81 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 上升到 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $11.28 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 表现为正温度系数(表1), 这是因为 JBS 器件在开启后其电流主要由外延层的电阻所决定。

表1 所制器件在不同温度下的导通电阻

Tab. 1 Switch-on resistances of the developed device under different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	25	50	100	150
$R_{\text{on}}/\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$	4.81	5.85	7.84	11.28

外延层的导通电阻 R_{on} 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{on}} &= \rho \times t_{\text{epi}} \\ \rho &= \frac{1}{N_{\text{D}} q \mu} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: μ ——外延层的载流子迁移率; t_{epi} ——外延层厚度; N_{D} ——外延层浓度; ρ ——外延层的电阻率。

随着温度的升高, ρ 会不断升高, 导致 R_{on} 增大。 ρ 升高的主要原因在于 μ 的下降。温度升高会导致材料内载流子的声子散射增强, 促使其内部的流动阻碍变大, 从而降低了迁移率。而对于 SiC 单极二极管来说, μ 是影响 ρ 的主要原因之一, 其随温度的上升而下降, 导致 ρ 随温度的上升而上升, 使 R_{on} 增大。

2.2 反向 I - V 特性

图4示出所研制的器件随温度变化的反向 I - V 特性, 其最高反向测试电压为 1300 V 。可以看到:

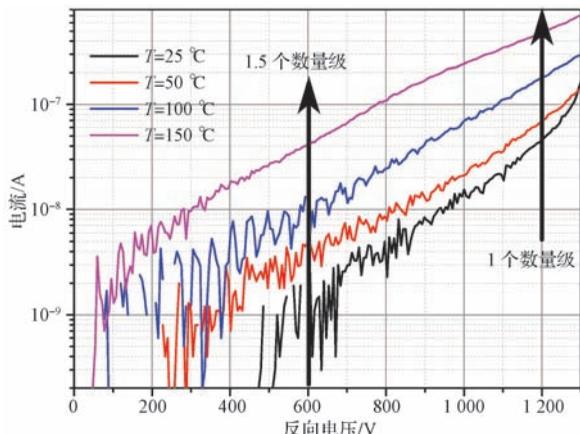


图4 所制器件随温度变化的反向 I - V 特性

Fig. 4 Reverse I - V characteristic of the fabricated device with temperature variation

(1) 器件的反向电压特性并没有随着温度的升高而退化, 能承受的反向电压均不低于 1300 V 。

(2) 反向电压为 600 V 时, $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的反向漏电流较常温时的上升了近 1.5 个数量级, 从 $1 \times 10^{-9} \text{ A}$ 到 $4 \times 10^{-8} \text{ A}$, 漏电流随着温度的升高而显著升高。反向电压为 1200 V 时, $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的反向漏电流则较常温时的

上升了约 1 个数量级, 从 $4.5 \times 10^{-8} \text{ A}$ 到 $5 \times 10^{-7} \text{ A}$, 这是由于在高压下, 反向漏电流由遂穿电流占主导^[9], 而遂穿电流对温度不敏感, 所以高温下反向漏电流与常温下的反向漏电流差距减小。

3 结语

到目前为止, SiC 器件尤其是商业化的 SiC 二极管器件, 对其可靠性评估方面的研究较少。我们对 1.2 kV 4H-SiC JBS 进行了实验室研制并对其温度特性进行研究, 结果显示所制器件具有良好的温度特性, 可以在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 工况下正常工作。静态 I - V 特性测试结果显示, 器件的肖特基势垒高度和理想因子未随温度的上升而发生变化, 导通电阻显示为正温度系数; 反向耐压未随温度的升高而退化, 泄漏电流在低压下上升了将近 1.5 个数量级, 而高压下则上升了近 1 个数量级。与国内外主流产品相比, 我们制备的器件性能虽然达到了业内产品的平均水平, 但还需在工艺稳定性、产品优良率控制等方面进行提升。为了能全面替代相应的 Si 功率器件, 后续我们将对所制器件进行可靠性方面的测试, 包括高温反偏特性、雪崩电流、浪涌电流等。

参考文献:

- [1] CHEN Fengping, ZHANG Yumin, ZHANG Yimen, et al. Temperature-dependent characteristics of 4H SiC junction barrier Schottky diodes [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(2): 400-404.
- [2] IVANOV P A, GREKHOV I V, POTAPOV A S, et al. Leakage currents in 4H-SiC JBS diodes [J]. Semiconductors 2012, 46(3): 397-400.
- [3] HUANG R H, CHEN G, BAI S, et al. Simulation, Fabrication and Characterization of 4500V 4H-SiC JBS diode [C] // Materials Science Forum, 2014, 778-780: 800-803.
- [4] HUANG Runhua, TAO Yonghong, CHEN Gang, et al. Simulation, Fabrication and Characterization of 6500V 4H-SiC JBS diode [C] // Advanced Materials Research, 2014, 846-847: 737-740.
- [5] NI Weijiang, LI Yuzhu, LI Zheyang, et al. 1200 V, 5A 4H-SiC JBS Working at $250 \text{ }^\circ\text{C}$ [J]. Research & progress of SSE, 2010(4): 478-480.
- [6] RAHUL R, WITT T, WOODIN R. Temperature Dependent Design of Silicon Carbide Schottky Diodes [C] // IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WIPDA), 2014: 151-154.
- [7] SONG Qingwen, ZHANG Yuming, ZHANG Yimen, et al. Investigation of current transport parameters of Ti/4H SiC MPS diode with inhomogeneous barrier [J]. Chinese Physics B, 2011, 20(5): 353-358.
- [8] ROCCAFORTE F, VIA La F, PIEROBON R, et al. Richardson's constant in inhomogeneous silicon carbide Schottky contacts [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(11): 9137-9144.
- [9] LIN Zhu, CHOW T P. Analytical Modeling of High-Voltage 4H-SiC Junction Barrier Schottky (JBS) Rectifiers [J]. IEEE Transactions on Electron Device, 55, 2008, 55(8): 1857-1863.