

基于 $I-V-T$ 和 $C-V-T$ 的 GaN 上 Ni/Au 肖特基接触特性研究*

刘 杰 郝 跃† 冯 倩 王 冲 张进城 郭亮良

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2006 年 8 月 9 日收到, 2007 年 1 月 30 日收到修改稿)

基于对制作在 n-GaN 上的肖特基二极管的变温 $I-V$ 测试和 $C-V$ 测试, 采用表面势垒减薄模型对肖特基二极管的电流输运特性进行了研究. 试验结果表明, 肖特基接触的电流输运机理非常复杂, 在不同的温度条件和偏压条件下有着不同的电流输运机理. 在此基础上对肖特基接触 $I-V$ 特性方程进行了修正, 得到了很好的拟合曲线. 试验表明, 高温 $I-V$ 法提取的势垒高度与常温 $C-V$ 法提取的势垒高度接近于根据金属功函数得出的理论势垒高度值.

关键词: 氮化镓, 肖特基二极管, 表面势垒减薄模型, 热电子场发射

PACC: 7280E, 7360L

1. 引 言

GaN 材料在高温器件和大功率微波器件方面有着非常好的应用前景^[1]. 近些年来 GaN 材料^[2], GaN 基高频大功率电子器件^[3]和光电器件^[4]研究取得了非常大的进步, 但是通过肖特基接触的泄漏电流过大不但影响器件工作的可靠性, 而且会造成器件功率增益和噪声水平的严重退化. 早期对肖特基接触的研究都是基于单一的热电子发射理论来解释电流输运, 从而得出势垒高度和理想因子^[5]. 事实上, 由于 GaN 表面不可能是理想的表面, 其表面状态非常复杂, 造成电子输运的方式也非常复杂. Zhang 等人认为近界面处的电子陷阱能级辅助发射是室温下漏电的主要机理^[6], Sawada 等人利用表面缺陷模型 (surface patch model) 来解释漏电流过大的原因^[7], 他们认为在表面缺陷处肖特基势垒高度下降 0.4 eV, 从而引起漏电流的显著增大. 而较多的研究者则采用表面势垒减薄模型 (thin surface barrier model, TSB) 来解释电流输运, 他们认为总体来看电流输运机理包括热电子发射、热电子场发射和场发射三种, 随着工作温度的不同以及肖特基二极管的制作材料差异, 其中一种或者两种将会起到主要的作用^[8,9]. 本文研究了 n-GaN 上制作的肖特基二极管的 $I-V-T$,

$C-V-T$ 特性, 采用 TSB 模型对实验现象进行了解释.

2. 实验与测试

本文中实验所用的 n-GaN 样品是采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 方法在蓝宝石衬底基片 (0001) 面上外延生长的. 蓝宝石衬底厚度为 330 μm , 材料层结构由下而上依次为: 300 nm 未掺杂 GaN 外延层, 600 nm 的 Si 掺杂 GaN 层, 在室温下通过 Hall 测试测得掺杂浓度为 $5.81 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 室温下利用 $C-V$ 法测得的自由载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 欧姆接触采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au (20 nm/120 nm/55 nm/45 nm), 然后在 830 °C N_2 氛围中快速热退火, 栅金属采用 Ni/Au (20 nm/200 nm). 肖特基二极管测试结构内外环直径分别为 125 μm 和 200 μm , 使用 HP4156B 精密半导体参数测试仪测试了器件直流特性, $C-V$ 测试采用 Keithley 590 $C-V$ 分析仪进行, 测试频率为 100 kHz, 采用 Westbond-K1200D 热板对器件进行加温.

3. 结果与讨论

图 1(a) 显示了 n-GaN 上 Ni/Au 肖特基二极管加反向偏压时的温度特性, 从图中我们可以看到, 随着

* 国家重点基础研究发展计划 (973) 批准号 51327020301, 2002CB311904 和西安应用材料创新基金 (批准号: XA-AM-200616) 资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: yhao@xidian.edu.cn

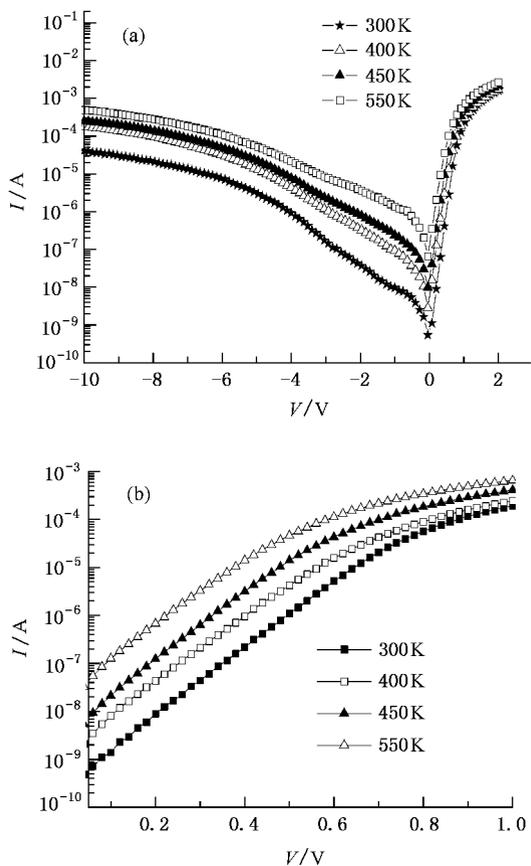


图 1 Ni/Au 肖特基二极管的 $I-V-T$ 特性 (a) 反向特性 (b) 正向特性

温度的升高,反向漏电流增大,550 K 时 -10 V 偏压下反向漏电流与 300 K 时相比增大了数量级。图 1(b) 是正向偏压时的温度特性,电流随着温度的上升而增大。GaN 材料是宽禁带半导体,其本征载流子浓度非常低,即使在高温下,本征载流子浓度与掺杂浓度相比也非常小,可以忽略不计,所以本文不考虑温度对于 GaN 材料费米能级的影响。

图 2 为根据 $I-V-T$ 曲线提取的 $\lg(I_C/T^2) - 1000/T$ 曲线,从曲线上我们看到随着温度的降低,曲线变的越来越平滑,这表明随着温度的升高,电子的激活能越来越大,即使在高温部分(400—550 K),由曲线拟合出的电子的激活能也只有 0.26 eV,说明反向电流的输运在低温部分主要是场发射,而高温部分热电子场发射占优势^[10]。图 3 所示为利用 TSB 模型和热电子场发射示意图。TSB 模型假定 GaN 表面存在着高的缺陷态密度,使得肖特基势垒宽度变薄,电子可以通过场发射(field emission)或者随着温度的升高通过热电子场发射(thermion field emission)通过势垒^[11]。本实验的结果表明,导带底下 0.26 eV 的

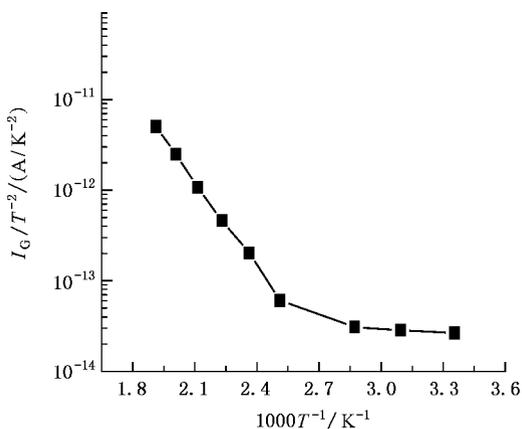


图 2 由 $I-V-T$ 曲线得出的 Richardson 曲线

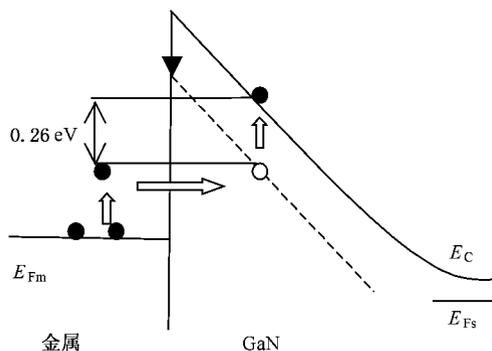


图 3 TSB 模型和热电子场发射示意图

电子陷阱能级在高温下能够辅助电子进行隧穿,这个结论与国外许多文献报道的结果相一致^[12]。

我们利用以上得到的 $I-V$ 特性曲线正向部分多变量非线性拟合的方法来研究肖特基势垒高度和理想因子随着温度的变化情况。肖特基势垒的 $I-V$ 特性方程为

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{tot} - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

其中, I_0 为饱和电流, $I_0 = AA^{**} T^2 \exp(-q\phi_b/kT)$, A 是管芯面积, A^{**} 为里查森常数, ϕ_b 为势垒高度; n 为理想因子; R_s 是串联电阻。在只考虑热电子发射机理的情况下,当 $V > 3kT/q$,可以忽视串联电阻 R_s 对电流特性的影响,对肖特基势垒的 $I-V$ 特性方程进行简化。但是由于电流输运并非只是热电子发射一种机理,隧穿电流的存在会造成串联电阻 R_s 对偏压非常敏感,这种简化计算的方法并不能得到很好的拟合曲线。最近已有文献报道了串联电阻 R_s 对于势垒参数提取的影响^[13],而我们研究发现将 R_s

看作是电流的函数,可以得到非常好的拟合曲线.将方程(1)变形得到

$$V = IR_s + \frac{nkT}{q} \left[1 + \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \right]. \quad (2)$$

在拟合过程中令 $R_s = P_1 I^2 + P_2 I + P_3$, 同时将 ϕ_b 和 n 也看作变量, 一起进行拟合, 图 4 为我们的拟合结果.

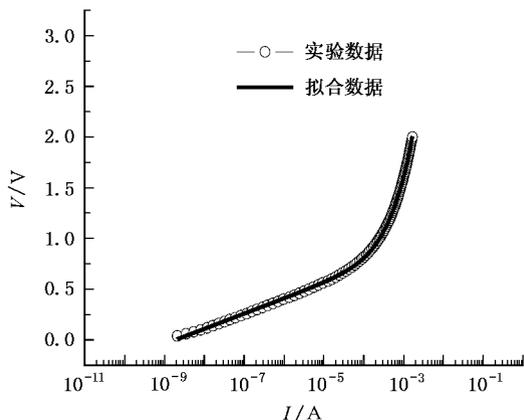


图 4 300 K 时正向 I-V 特性拟和图

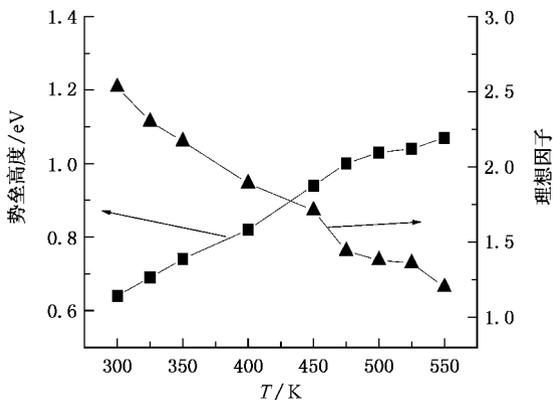


图 5 肖特基势垒高度和理想因子的温度特性曲线

从图 4 中可以看到, 实验曲线与方程(2)拟合的很好, 这是由于我们将 R_s 作为电流的非线性函数, 考虑到了场发射机理的作用, 使得电流输运方程更加接近实际情况, 由此拟合曲线计算得出的势垒高度和理想因子为 0.64 eV 和 2.53, 表明低温下正向电流中的场发射分量对于势垒高度和理想因子的提取能够造成较大影响, 使得势垒高度低于理论值, 理想因子严重偏离 1. 在不同温度下利用上述方法对 I-V-T 曲线进行拟合我们可以得到势垒高度和理想因子随温度的变化曲线如图 5 所示. 从图 5 我可以

看到随着温度的升高, 肖特基势垒高度增大, 理想因子减小, 在 550 K 势垒高度为 1.08 eV, 理想因子降低为 1.2. 这与图 2 反应的激活能变化相一致, 这是由于热电子发射对温度变化非常敏感, 随温度升高很快上升, 而场发射对于电压变化比较敏感而对温度不太敏感, 所以随着温度的升高, 正向电流中的场发射电流分量所占比例下降, 影响减小, 此时提取的势垒高度值变大, 理想因子减小, 并且接近真实值.

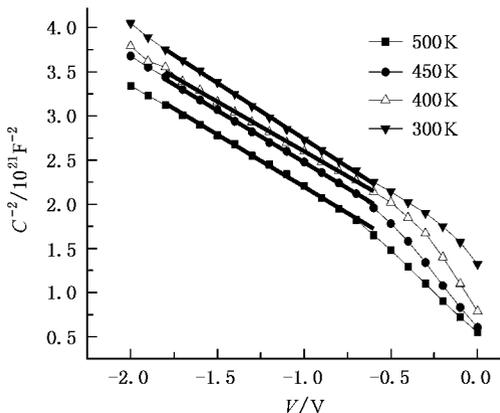


图 6 肖特基二极管的 C-V-T 特性

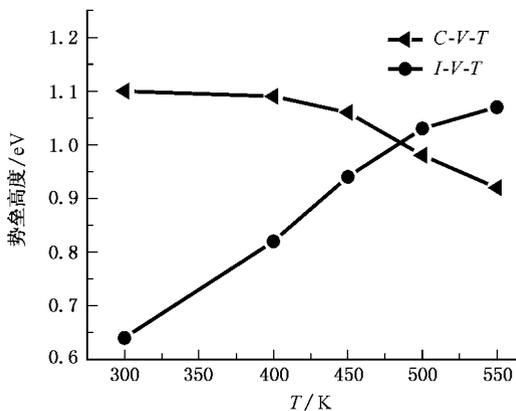


图 7 I-V-T 与 C-V-T 提取势垒高度随温度的变化

图 6 所示为肖特基二极管的 C-V-T 特性, 图 7 为 I-V-T 和 C-V-T 两种不同的方法提取的势垒高度随温度的变化关系, 从图中可以看 C-V 法提取的势垒高度在低温时要高于 I-V 法提取的势垒高度, 而高温部分 C-V 提取的势垒高度反而小于 I-V 法提取的势垒高度, 这是由于高温下正向电流中的场发射分量的影响下降, 使得 I-V 曲线提取的势垒高度升高而高温下电子被陷阱能级俘获/释放过程造成的附加电容使得 C-V 法提取的势垒高度有所下降. 高温下 I-V 提取的势垒高度与低温下 C-V 提取的势垒高度非常接近都为 1.10 eV 左右, 与 Ni 的功函数

(5.15 eV) 计算出的势垒高度一致, 表明这两种情况下提取的势垒高度比较接近真实值, 这个现象与 Sawata 等人^[7]报道的结果相一致.

4. 结 论

本文对 n-GaN 材料上的 Ni/Au 肖特基二极管采用 TSB 模型对 $I-V-T$, $C-V-T$ 曲线进行了分析, 从 $I-V-T$ 曲线提取的激活能与理想因子随温度的变化情况来看, 在常温下场发射是反偏电流运输的主要机

理, 而高温下热电子场发射成为决定反偏电流运输的主要机理. 研究发现, 将串联电阻 R_s 作为电流的函数来对肖特基势垒的 $I-V$ 特性方程进行非线性拟合能够得到非常好的拟合曲线, 利用这种方法提取的高温势垒高度(1.08 eV)与低温 $C-V$ 法得到的势垒高度(1.10 eV)和由 Ni 的功函数计算得到的理论势垒高度(1.10 eV)非常接近, 表明我们可以用高温 $I-V$ 曲线的非线性拟合方法或者低温 $C-V$ 测试的方法得到真实肖特基接触势垒高度值.

-
- [1] Sun X W , Chu Y D , Liu Z J , Liu Y X , Wang C W , Liu W M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5830 (in Chinese) [孙小伟、褚衍东、刘子江、刘玉孝、王成伟、刘维民 2005 物理学报 **54** 5830]
- [2] Peng D S , Feng Y C , Wang W X , Liu X F , Shi W , Niu H B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3606 (in Chinese) [彭冬生、冯玉春、王文欣、刘晓峰、施 炜、牛憨笨 2006 物理学报 **55** 3606]
- [3] Hao Y , Han X W , Zhang J C , Zhang J F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3622 (in Chinese) [郝 跃、韩新伟、张进城、张金凤 2006 物理学报 **55** 3622]
- [4] He Z , Kang Y , Tang Y W , Li X , Fang J X 2006 *Chin. Phys.* **15** 1325
- [5] Zhu S Y , Ru G P , Zhou J , Huang Y P 2005 *Chin. Phys.* **14** 1639
- [6] Zhang H , Miller E J , Yu E T 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023703
- [7] Sawada T , Ito Y , Kimura N , Imai K , Suzuki K , Sakai S 2003 *Appl. Surf. Sci.* **216** 192
- [8] Benamara Z , Akkal B , Talbi A , Gruzza B 2006 *Mater. Sci. Eng. C* **26** 519
- [9] Lin Y J , Lin W X , Lee C T , Chang H C 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 2505
- [10] Menozzi R 2004 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **4** 54
- [11] Hashizume T , Kotani J , Hasegawa H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4884
- [12] Hasegawa H , Inagaki T , Ootomo S , Hashizume T 2003 *J. Vac. Sci. Technol.* **21** 1844
- [13] Osvald J 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 033708

Characterization of Ni/Au GaN Schottky contact base on $I-V-T$ and $C-V-T$ measurements^{*}

Liu Jie Hao Yue[†] Feng Qian Wang Chong Zhang Jin-Cheng Guo Liang-Liang

(*The Institute of Microelectronics Xidian University ,Key Laboratory of Ministry of Education
for Wide Band gap Semiconductor Materials and Devices ,Xi'an 710071 ,China*)

(Received 9 August 2006 ; revised manuscript received 30 January 2007)

Abstract

Based on the temperature-dependent current-voltage ($I-V-T$) measurements and the temperature-dependent capacitance-voltage ($C-V-T$) measurements of Schottky diodes fabricated on n-type GaN ,the mechanism of the electrical current transport was discussed using thin surface barrier (TSB) model. The experiment results indicated that there are different mechanisms at different temperatures and bias. Based on this assumption we give a modified $I-V$ characteristic formula which gives excellent fit to the experiment data. The SBHs determined from high-temperature $I-V$ curves ,low-temperature $C-V$ curves ,and the metal work function agree well each other.

Keywords : GaN , Schottky diode , thin surface barrier model , thermion field emission

PACC : 7280E , 7360L

^{*} Project supported by the National Key Basic Research and Development Program of China (Grant Nos. 51327020301 ,2002CB311904) and Xi'an Applied Materials Innovation Fund of China (Grant No. XA-AM-200616).

[†] Corresponding author. E-mail : yhao@xidian.edu.cn