

## Au-GaN 肖特基结的伏安特性\*

林兆军 张太平 武国英 王 玮 阎桂珍 孙殿照<sup>1</sup> 张建平<sup>1</sup> 张国义<sup>2</sup>

(北京大学微电子所, 北京 100871)

(1 中国科学院半导体研究所新材料部, 北京 100083)

(2 北京大学物理系, 北京 100871)

**摘要:** 在 MBE 和 MOCVD 两种方法制备的 n-GaN 材料上制作了 Au-GaN 肖特基结, 测定了肖特基结的室温  $I-V$  特性。分析表明: GaN 材料的载流子浓度对肖特基结的特性有很大的影响。

**关键词:** MBE; MOCVD; GaN; 肖特基结; 伏安特性

**PACC:** 7330; 7340; 7360

**中图分类号:** TN311.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-4177(2000)04-369-04

## ***I-V Characteristics of Au-GaN Schottky Junction***\*

LIN Zhao-jun, ZHANG Tai-ping, WU Guo-ying, WANG Wei, YAN Gui-zhen,  
SUN Dian-zhao<sup>1</sup>, ZHANG Jian-ping<sup>1</sup> and ZHANG Guo-yi<sup>2</sup>

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(1 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Received 23 November 1998, revised manuscript received 8 March 1999

**Abstract:** Au-GaN Schottky junction has been fabricated on n-GaN materials by MOCVD and MBE.  $I-V$  characteristics of the Schottky junctions have been determined at room temperature. It is shown that Schottky junction characteristics are seriously affected by the carrier concentration of GaN materials.

**Key words:** MBE; MOCVD; GaN; Schottky junction;  $I-V$  characteristics

**PACC:** 7330; 7340; 7360

**Article ID:** 0253-4177(2000)04-369-04

\* 国家“九五”科技攻关资助项目[Project Supported by National Ninth-5 year Science and Technology Development Program of China].

林兆军 男, 1962 年出生, 博士后, 目前从事 GaN 器件研究工作。

张太平 男, 1944 年出生, 高级工程师, 现从事半导体器件研究工作。

1998-11-23 收到, 1999-03-08 定稿

## 1 引言

GaN 是一种化学性质稳定、热导率高的宽带隙半导体材料, 可用于制作电子和光电子器件以及理想的高功率和高温器件。GaN 电子器件的研究现已成为一个热点, 已有关于 GaN MESFET<sup>[1,2]</sup>、GaN/AlGaN MODFET<sup>[3-5]</sup>。在 GaN 电子器件的制备中, 金属与 GaN 形成肖特基结是器件制备的关键工艺之一, 我们在 GaN 材料上制备了 Au-GaN 的肖特基结, 对所形成的肖特基结的特性做了测试分析, 发现载流子浓度对肖特基结的特性有很大影响。

## 2 实验

采用 MOCVD 和 MBE 两种方法制备 GaN 单晶材料。MOCVD 方法是在蓝宝石衬底上首先生长约 30nm 的 GaN 缓冲层, 接着在缓冲层上生长 GaN 单晶, GaN 单晶层的厚度约 1.0μm, 室温下的背景载流子浓度和迁移率分别是  $6.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  和  $70 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。MBE 方法制备的 GaN 单晶材料是首先在蓝宝石衬底上生长约 20nm 的 AlN 缓冲层, 然后在缓冲层上生长 GaN 单晶, GaN 单晶的厚度是 0.7μm, 室温下的背景载流子浓度和迁移率分别是  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  和  $73 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。MOCVD 和 MBE 两种方法制备的 GaN 材料, 它们的(0002)X 射线双晶衍射峰的半高宽分别为 10' 和 8', 这两种材料样品均未做有意掺杂, 在显微镜下观察, 表面平整光亮。首先对 GaN 样品进行清洁处理: 在王水中煮 15min, 接着在丙酮、乙醇、去离子水中各超声清洗 10min, 最后经氮气吹干并在真空烘箱(110℃)中烘 30min。肖特基结通过真空热蒸发金形成, 热蒸发时的真空度约  $1.4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 金层厚度约 0.3μm, 肖特基结的面积是  $1.28 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 。通过在 n-GaN 上溅射 Ti/Al/Ti/Au(20nm/200nm/50nm/100nm)四层复合金属并经高温退火处理后形成欧姆接触。

## 3 结果与讨论

用 HP4156B 测试仪在室温测定了 MOCVD 和 MBE 两种方法制备的 GaN 材料与 Au 形成肖特基结的 I-V 特性。图 1、图 2 分别是 MOCVD 和 MBE 法制备的 GaN 材料肖特基结的 I-V 特性曲线。从图 1 和图 2 看出, MOCVD 材料肖特基结的反向击穿电压约 2V, 而 MBE 材料肖特基结的反向击穿电压约 5V。根据 p-n 结击穿理论<sup>[6]</sup>, 击穿电压  $V_b < 4(E_g/q)$  ( $V_b$ : 击穿电压,  $E_g$ : 材料禁带宽度) 属齐纳击穿, GaN 材料的带隙(室温)为 3.39eV<sup>[7]</sup>, 对应有:  $4(E_g/q) = 13.56\text{V}$ 。两种 GaN 材料肖特基结的击穿电压均小于 13.56V, 这表明它们的击穿均属齐纳击穿。齐纳击穿主要由空间电荷区的最大电场强度决定, 载流子浓度高的材料, 其肖特基结空间电荷区的电场强度大, 齐纳击穿电压低。

在正向电压大于  $3kT/q$  的条件下, 肖特基结的 I-V 方程可写为<sup>[8]</sup>:

$$I = I_0 \exp[q(V - IR)/nkT] \quad (1)$$

其中  $n$  为理想因子;  $R$  是串联电阻;  $I_0$  是饱和电流, 并且:

$$I_0 = SA^* T^2 \exp(-\phi/kT) \quad (2)$$

式中  $S$  是肖特基结的面积;  $A^*$  为里查逊常数, 且  $A^* = 4\pi m^* q k^2/h^3$ , 在这里  $m^*$  为 GaN 导带电子的有效质量;  $\phi$  是肖特基结的势垒高度;  $k$  是玻尔兹曼常数;  $h$  为普朗克常数。

在正向电流比较低的条件下, 方程(1)又可进一步简化为:

$$I = I_0 \exp(qV/nkT) \quad (3)$$

从已测得的肖特基结 I-V 特性曲线上(图 1 和图 2)选取电压非常接近的两点(两点电压的间隔为 0.025V), 把这两点的电压和电流数值代入(3)列出联立方程, 并结合(2)即可解出肖特基结的势垒高度。在计算中, 取 GaN 导带电子的有效质量<sup>[9]</sup>  $m^* = 0.17m_0$  ( $m_0$ : 电子质量), 可计算得到 Au 与两种 GaN 材料肖特基结的势垒高度, 它们分别是 0.57eV(MOCVD 材料)和 0.92eV(MBE 材料)。GaN 材料为极性半导体材

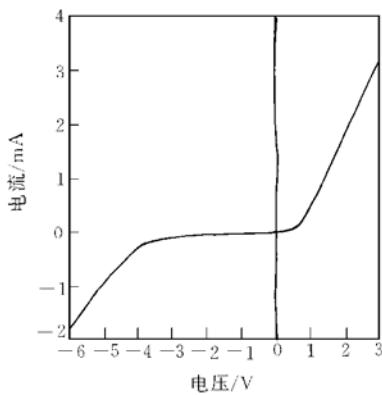


图 1 Au 与 MOCVD 制备的 GaN 材料形成肖特基结的  $I$ - $V$  特性曲线

FIG. 1  $I$ - $V$  Characteristic Curve of Schottky Junction Formed on GaN Material Manufactured by Au and MOCVD.

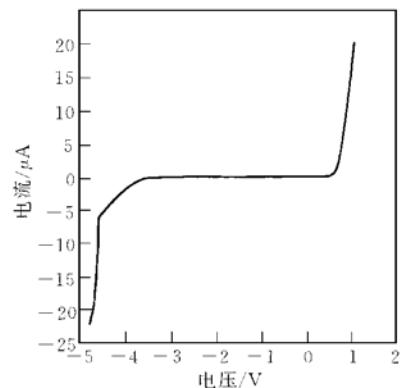


图 2 Au 与 MBE 制备的 GaN 材料形成肖特基结的  $I$ - $V$  特性曲线

FIG. 2  $I$ - $V$  Characteristic Curve of Schottky Junction Formed on GaN Material Manufactured by Au and MBE.

料,较强的离子键使 GaN 表面不存在由悬挂键引起的本征表面态,因而不存在高密度表面态对肖特基结势垒高度的锁定效应,不同金属与 GaN 材料可形成具有不同势垒高度的肖特基结<sup>[8,10]</sup>。金属与 GaN 材料形成肖特基结的势垒高度取决于金属功函数与 GaN 电子亲和能之差,这样取 Au 的功函数为 5.1eV<sup>[10]</sup>,GaN 的电子亲和能 4.07eV<sup>[10]</sup>,Au 与 GaN 材料形成的肖特基结势垒高度约 1.03eV。但实际制备的肖特基结,在金属-半导体之间一般总存在一薄的氧化层,并在界面上有一定数量的界面态存在。界面介质层和界面态的存在使得肖特基结的势垒高度不再仅由金属功函数和半导体材料的电子亲和能决定,考虑界面介质层和界面态的影响,Au 与 GaN 材料形成的肖特基结势垒高度有关系式<sup>[11]</sup>:

$$\phi = 1.03 - \alpha(N_d)^{0.5} \quad (4)$$

式中  $\alpha$  是与界面介质层和界面态相关的系数; $N_d$  为材料的载流子浓度。(4) 式表明,在界面介质层和界面态的影响下,肖特基结的势垒高度随半导体材料载流子浓度的升高而降低,由此可以解释 MOCVD 材料肖特基结势垒高度(0.57eV)与 MBE 材料肖特基结势垒高度(0.92eV)的差别。

计算得到的势垒高度由于受界面介质层、界面态及镜象力的影响,它是肖特基结有效势垒高度。特别是,由于计算中所取里查逊常数没有考虑光学声子散射、量子力学反射及隧穿效应的影响<sup>[12]</sup>,计算出的势垒高度存在一定的误差,隧穿电流越大,这种误差也就越大。

由方程(3)并通过测定的正向特性对数曲线(图 3),可确定两种 GaN 材料肖特基结的理想因子,计算得到 MOCVD 和 MBE 两种 GaN 材料与 Au 形成肖特基结的理想因子分别为 1.87 和 2.2。理想因子  $n$  表示  $I$ - $V$  特性偏离理想方程的程度,从已计算得到的理想因子看出,两种 GaN 材料肖特基结的  $I$ - $V$  特性都与理想方程有较大的偏离。导致理想因子大于 1 的因素有隧穿电流、金属-半导体界面的介质层以及界面态<sup>[10,11]</sup>。对于 MOCVD 法制备的 GaN 材料,其载流子浓度比较高( $6.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ),隧穿电流可能是导致肖特基结  $I$ - $V$  特性偏离理想方程的主要原因。而对于 MBE 制备的 GaN 材料,载流子浓度比较低( $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ),但它的理想因子却达到 2.2,在这里界面介质层和界面态应是导致  $n$  增大的主要原因。

GaN 作为宽带隙的半导体材料,它应具有高的击穿电压,但我们制备的 Au-GaN 肖特基结反向击穿电压均比较低。这主要源于 Au-GaN 界面的介质层和界面态的影响,对于 MOCVD GaN 材料,高的载流子浓度也是使肖特基结特性变坏的主要原因之一。综合以上分析,GaN 材料的载流子浓度,Au-GaN 界面的介质层以及界面态都会对肖特基结的反向击穿电压和势垒高度产生影响。

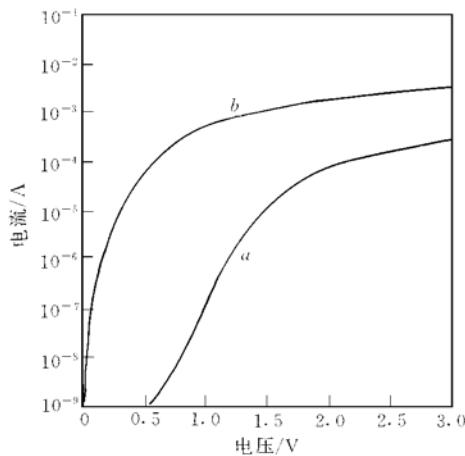


图 3 a: Au 与 MBE 制备的 GaN 材料形成的肖特基结的正向  $I-V$  特性的对数曲线;  
b: Au 与 MOCVD 制备的 GaN 材料形成的肖特基结的正向  $I-V$  特性的对数曲线

FIG. 3 a: Logarithm Curve of Forward  $I-V$  Characteristic of the Schottky Junction Formed on GaN Material Manufactured by Au and MBE; b: Logarithm Curve of Forward  $I-V$  Characteristic of Schottky Junction Formed on GaN Material Manufactured by Au and MOCVD.

#### 4 结论

我们在 MOCVD 和 MBE 两种方法制备的 GaN 材料上制备了 Au-GaN 肖特基结，并测定了肖特基结的  $I-V$  特性。分析表明 GaN 材料的载流子浓度对 Au-GaN 肖特基结的特性会产生很大影响。要制备良好的 Au-GaN 肖特基结，要求材料的载流子浓度要低，并且最大限度地消除界面介质层和界面态的影响。

#### 参 考 文 献

- [1] M. A. Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattacharai and D. T. Olson, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**(15): 1786.
- [2] S. C. Binari, L. B. Rowland, W. Kruppa, G. Kelner, K. Doverspike and D. K. Gaskill, Electronics Letters, 1994, **30**(15): 1248.
- [3] Y. F. Wu, S. Keller, P. Kozodoy, B. P. Keller, P. Parikh, D. Kapolnek, IEEE Electron Device Letters, 1997, **18**(6): 290.
- [4] O. Aktas, Z. F. Fan, A. Botchkarev, S. N. Mohammad, M. Roth, T. Jenkins, L. Kehias and H. Morkoc, IEEE Electron Device Letters, 1997, **18**(6): 293.
- [5] D. V. Kuksenkov, H. Temkin, R. Gaska and J. W. Yang, IEEE Electron Device Letters, 1998, **19**(7): 222.
- [6] 浙江大学半导体器件教研室编, 晶体管原理, 北京: 国防工业出版社, 1980, 49[ Principle of Transistors, Eds by Division of Teach and Research, Zhejiang University National Defence Industry Press, Beijing 1980, p. 49].
- [7] H. Morkoc, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin and M. Burns, J. Appl. Phys., 1994, **76**(3): 1363.
- [8] P. Hacke, T. Detchprohm, K. Hiramatsu and N. Sawaki, Appl. Phys. Lett., 1993, **63**(19): 2676.
- [9] Y. C. Yeo, T. C. Chong and M. F. Li, J. Appl. Phys., 1998, **83**(3): 1429.
- [10] E. V. Kalinina, N. I. Kuznetsov, Journal of Electronic Materials, 1996, **25**(5): 831.
- [11] 王家骅, 李长健, 牛文成, 半导体器件物理, 北京: 科学出版社, 1983, 171—173[ WANG Jiahua, LI Changjian, NIU Wencheng, Physics of Semiconductor Devices, Scientific Press, Beijing, 1983, p. 171—173(in Chinese)].
- [12] 施敏, 半导体器件物理, 北京: 电子工业出版社, 1987, 182[ SHI Min, Physics of Semiconductor Devices, Electron Industry Press, Beijing 1987, p. 182(in Chinese)].