

GaN肖特基紫外探测器的电流输运研究*

Current Transport of GaN Schottky UV Detectors

李福宾, 林 硕, 李建功, 沈晓明

LI Fu-bin, LIN Shuo, LI Jian-gong, SHEN Xiao-ming

(广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004)

(School of Physics Science and Engineering Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要: 为了探明 GaN 肖特基紫外探测器漏电流问题, 提高探测器的性能, 在已有的各种电流输运模型的基础上, 把宽禁带的 GaN 半导体材料 ($E_g > 3.4\text{eV}$) 看作绝缘体, 用空间电荷限制电流理论 (SCLC) 分析由金属有机物化学气相沉积法 (MOCVD) 生长的金属-GaN 肖特基紫外探测器样品的 $I-V$ 和 $I-V-T$ 曲线。结果表明, SCLC 机制控制的电流成分占主导地位, 对于两个转换电压 V_1, V_2 , 在 $V < V_1$ 的区域电流电压遵循欧姆定律, 在 $V_1 < V < V_2$ 的区域遵循幂指数规律 $I \propto V^m$, 在 $V > V_2$ 的区域电流电压遵循 SCLC 平方率。

关键词: GaN 肖特基 紫外探测器 电流输运

中图分类号: O47, TL814 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2009)02-0158-03

Abstract The anomalously large leakage current of GaN Schottky UV detectors will impact their performances. In this paper, we analyzed the $I-V$ and $I-V-T$ curves of the M-GaN Schottky UV detector samples grown by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD). The space-charge-limited current (SCLC) is considered as the dominating current transport mechanism. Unlike in the case of thermal emission mechanism, the current-voltage relationship follows Ohm's law while $V < V_1$, it follows the power-law while $V_1 < V < V_2$, however, it changes to be the SCLC rule while $V > V_2$. The reason is analyzed in this paper.

Key words GaN, schottky, UV detectors, current transport

GaN 基半导体材料是直接带隙材料, 具有宽的禁带宽度, 电子漂移速度大, 热导率高, 介电常数低, 非常适合制作高频、高功率、高温、抗辐射和高密度集成的电子器件, 近年来在世界范围内引起了广泛的关注。GaN 基材料具有日盲特性^[1], 是制作紫外探测器的理想材料。然而, GaN 基半导体材料在生长和掺杂过程中所形成的高密度结构和残留杂质严重影响着探测器的性能, 使 GaN 基肖特基紫外探测器产生异常大的漏电流, 这对制作高性能的探测器非常不利。为了探明漏电流的产生机制, 减小漏电流, 从而制作出高性能的探测器, 对 GaN 肖特基接触的电流输运特性进行研究十分必要。

目前对 GaN 基肖特基接触电流输运特性的报导已有很多, Suzue 等人^[2]研究了 Pt-GaN 肖特基二极管的电学特性, 他们推测电流输运是由多种机制组成的, 对热发射 (TE) 理论进行了修正, 认为可将总电流看作 4 种电流成分之和, 即

$$I = I_e + I_{un} + I_{gr} + I_{lk}, \quad (1)$$

其中 I_e 为热发射电流, I_{un} 为隧穿电流, I_{gr} 为产生-复合电流, I_{lk} 为漏电流, 在不同条件下由不同的电流机制主导。Carrano 等人^[3]对不同厚度的 MSM GaN 紫外探测器进行研究, 他们认为薄样品的 $I-V$ 特性曲线要用热电场发射 (TFE) 理论进行拟合, 而厚样品可用热发射 (TE) 理论进行拟合。对于同一薄样品的多次实验中 $I-V$ 曲线存在的退化机制, 他们认为可用陷阱辅助隧穿机制来定性解释。然而 Hasegawa 等人^[4-7]认为陷阱辅助隧穿机制存在一定的缺陷, 提出了薄表面势垒模型 (TSB)。他们假设在界面处有一厚度为 D 的 TSB 区, 是由表面附近高浓度的施主型非故意掺

收稿日期: 2008-11-17

修回日期: 2008-12-18

作者简介: 李福宾 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事 GaN 基光电材料与器件的研究。

* 广西科学基金项目 (No. 0731012) 资助。

杂缺陷形成,它们使肖特基势垒宽度变窄,所以无论在正偏还是反偏下,电子以 TFE 或 FE 机制发生隧穿的几率大大增加,从而可以解释实验中所观察到的异常大的漏电流。另外, Sawada 等人^[8-10]在对金属-GaN 进行研究时发现理查逊常数非常分散,由 $I-V$ 和 $C-V$ 方法得到的肖特基势垒高度 (SBH) 值差别也很大,在室温时漏电流也非常大,并且漏电流对表面的制备方法和低温退火非常敏感。他们认为这是由于肖特基势垒高度 SBH 非均匀分布造成的,即存在所谓的具有低肖特基势垒高度的表面微区 (SP)。

上述各种模型有一个共同的特点,它们都是对金属半导体界面进行研究,提出各种机制使肖特基势垒降低或宽度变窄,从而有利于电子隧穿通过势垒,使漏电流增大。本文基于 Smith 和 Rose 等人^[11-12]的研究成果尝试把宽禁带的 GaN 基半导体材料 ($E_g > 3.4\text{eV}$) 看做绝缘体,用 SCLC 理论对使用 MOCVD 方法生长的金属-GaN 样品的电流特性进行分析。

1 实验部分

如图 1 所示,在低压下用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长六方相 GaN,镓源是三甲基镓 (TM Ga),氮源是高纯氨气 (NH_3)。首先在 550°C 生长一个 20nm 低温 GaN 缓冲层,再在 1100°C 生长 $1\mu\text{m}$ 重掺杂 n 型 GaN 外延层,浓度为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,接着再生长 $0.6\mu\text{m}$ GaN 外延层。对 GaN 进行清洗后,用标准光刻法在本征 GaN 层上制作 Ni/Au 肖特基透明电极,先溅射 5nm 的 Ni,再溅射 5nm 的 Au;在刻蚀后的 n 型 GaN 外延层上溅射 Ti/Al/Ti/Au ($150\text{A}/2500\text{A}/500\text{A}/2500\text{A}$),制作欧姆电极。

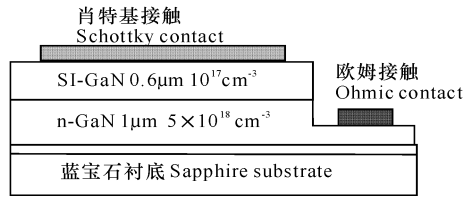


图 1 GaN 基肖特基紫外探测器

Fig. 1 Schematic diagram of the GaN Schottky UV detectors

2 结果与分析

由图 2 可以看出, $I-V$ 曲线可以分为 3 个区域^[13],有两个转换电压 $V_1 = 1\text{V}$, $V_2 = 2.6\text{V}$ 。通过拟合可知,在 $V < 1\text{V}$ 的区域曲线斜率在 1 附近,说明电流随电压线性增长,电流电压特性遵循欧姆定律;在 $1\text{V} < V < 2.6\text{V}$ 的区域电流随电压快速增长,电流电压呈幂指数关系 $I \propto V^m$;当 $V > 2.6\text{V}$ 时,电流出现跳

变,这是一个非常奇特的现象,之后曲线斜率近似为 2,这说明电流按电压的平方率增长,电流电压遵循平方率 (Child 定律)。这种电流电压特性是一种典型的 SCLC 特性。

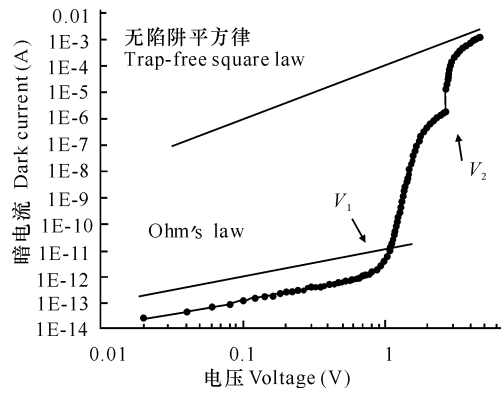


图 2 室温下样品电流电压正偏双对数曲线

Fig. 2 Log-Log plots of $I-V$ for the GaN Schottky sample at room temperature

从图 3 可以看出在低电压区,电流电压同样遵循欧姆定律且电流随着温度的升高而升高;在高电压区,各温度下都遵循平方率且电流受温度的影响变小。随着温度的升高转换电压 V_1 不断减小,而 V_2 基本不变。

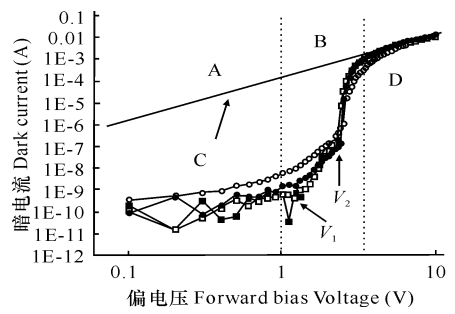


图 3 不同温度下样品电流电压正偏双对数曲线

Fig. 3 Log-Log plots of $I-V-T$ for the GaN Schottky sample at different temperature

A 陷阱填充或欧姆导电机制; B 多种机制; C 无陷阱绝缘体平方律; D SCLC 机制。

A Trap filling regime or ohmic conduction regime; B Multi-regime; C Trap free insulatorsquare law; D SCLC regime

■: 300K; □: 373K; ●: 473K; ○: 573K.

我们把欧姆接触电极 B (图 4) 看做一个无限载流子源,可以源源不断的为样品提供电子。当电压较低时 ($V < V_1$),由电极 B 注入的载流子基本被 n-GaN 体内的陷阱俘获,陷阱主要来源于施主型掺杂产生的缺陷,氮空位、位错及其他的一些复合作用。另一方面由热激发 (TE) 作用,半导体体内会产生一些热生载流子,此时热生载流子数目大于注入载流子数目,电

流主要由热生载流子形成,而热生载流子的数目受温度的影响很大,所以在图3中可以看到低压区电流随温度的升高而升高。我们可以把低电压区的肖特基接触看作一个电导率很低的导体,遵循欧姆定律。

当电压进一步升高,电流的运输机制比较复杂,一方面在界面处由于电压升高肖特基势垒宽度变窄,电子的隧穿效应变得明显。另一方面注入载流子数目增多,参与导电的注入载流子也越来越多。另外还有热场发射(TFE)、场发射(FE)等其他电流成分也不断增强。所以电流在 $V_1 < V < V_2$ 的区域电流快速增长,遵循幂指数规律 $I \propto V^m$, 指数 m 由下式确定^[14]:

$$m = \frac{T_c}{T} + 1, \quad (2)$$

其中 T_c 是特征温度,由半导体的陷阱能级分布确定, T 为热力学温度。由(2)式可以看出温度 T 越高 m 值越小,则 $I-V-T$ 对数曲线的斜率应该越小。在图3中曲线斜率随温度的升高而变小正符合此式规律。图3中转换电压 V_1 随着温度的升高而不断减小。这是由于温度越高时各种机制同时起作用所需要的电压就会越小,那么由欧姆率导电向其他导电机制的转换电压越小。

当电压达到陷阱填充极限电压 V_2 时,半导体内的陷阱填充完毕,由电极B注入的大量载流子聚集在电极附近,电流运输机制跳变到由体效应 SCLC 机制占主导地位的运输机制,其他运输机制随电压的升高也在不断加强,但与 SCLC 机制相比可以忽略,所以电流受温度的影响也变小。在 $V > V_2$ 的区域电流电压遵循相当于无陷阱时的 SCLC 平方率 (Child 定律)。

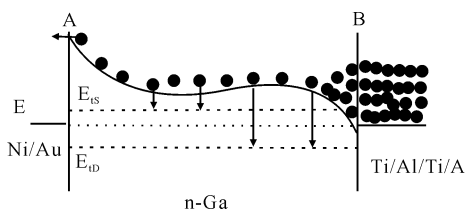


图4 n-GaN肖特基紫外探测器能带

Fig. 4 Schematic energy band diagram of the GaN Schottky UV detectors
A 肖特基接触; B 欧姆接触。 A Schottky contact; B Ohmic contact.

3 结束语

由 MOCVD 方法生长的 GaN 肖特基紫外探测器样品的电流成分并不单一,它是各种电流成分的集体效应,然而通过对 $I-V$ 及 $I-V-T$ 曲线的分析,我们认为 SCLC 机制控制的限制作用占主导地位。在 $V < V_1$ 的区域电流电压遵循欧姆定律;在 $V_1 < V < V_2$ 的

区域电流快速增长,遵循幂指数规律 $I \propto V^m$; 在 $V > V_2$ 的区域电流电压遵循 SCLC 平方率。

参考文献:

- [1] 李向阳,许金通,汤英文,等. GaN 基紫外探测器及其研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 276-280.
- [2] Suzue K, Mohammad S N, Fan Z F, et al. Electrical conduction in platinum-gallium nitride Schottky diodes [J]. J Appl Phys, 1996, 80(8): 4467-4478.
- [3] Carrano J C, Li T, Grudowski P A, et al. Current transport mechanisms in GaN-base metal-semiconductor-metal photodetectors [J]. Appl Phys Lett, 1998, 72(5): 542-544.
- [4] Kotani J, Hasegawa H, Hashizume T. Computer simulation of current transport in GaN and AlGaIn Schottky diodes based on thin surface barrier model [J]. Applied Surface Science, 2004, 237: 213-218.
- [5] Oyama S, Hashizume T, Hasegawa H. Mechanism of current leakage through metal/n-GaN interfaces [J]. Applied Surface Science, 2002, 190: 322-325.
- [6] Hashizume T, Kotani J, Hasegawa H. Leakage mechanism in GaN and AlGaIn Schottky interfaces [J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(24): 4884-4886.
- [7] Hasegawa H, Oyama S. Mechanism of anomalous current transport in n-type GaN Schottky contacts [J]. J Vac Sci Technol B, 2002, 20(4): 1647-1655.
- [8] Sawada T, Ito Y, Kimura N, et al. Characterization of metal/GaN Schottky interfaces based on $I-V-T$ characteristics [J]. Applied Surface Science, 2002, 190: 326-329.
- [9] Sawada T, Ito Y, Imai K, et al. Electrical properties of metal/GaN and SO_2/GaN interfaces and effects of thermal annealing [J]. Applied Surface Science, 2000, 159-160: 449-455.
- [10] Sawada T, Izumi Y, Kimura N, et al. Properties of GaN and AlGaIn Schottky contacts revealed from $I-V-T$ and $C-V-T$ measurements [J]. Applied Surface Science, 2003, 216: 192-197.
- [11] Rose A. Space-charge-limited currents in solids [J]. Phys Rev, 1955, 97(6): 1538-1544.
- [12] Smith R W, Rose A. Space-charge-limited currents in single crystal of cadmium sulfide [J]. Phys Rev, 1955, 97(6): 1531-1537.
- [13] Shen X M, Zhao D G, Liu Z S, et al. Space-charge-limited currents in GaN Schottky diodes [J]. Solid-State Electronics, 2005, 49: 847-852.
- [14] Liang Ting, Guo Xia, Guan Bao-lu, et al. Current-voltage characteristics of p-GaAs/n-GaN heterojunction fabricated by wafer bonding [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(10): 102-107.

(责任编辑:尹 闯)