

# 非晶 GaN 薄膜的空间电荷限制电流特性

张振兴 谢二庆<sup>†</sup> 潘孝军 贾璐 韩卫华

(兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000)

**摘要:** 采用直流磁控溅射技术制备了 Si 衬底上的非晶 GaN 薄膜. GaN 肖特基二极管伏安曲线不能简单地用包含串联电阻和复合电流效应的热电子发射理论来解释, 其他电流输运机制(空间电荷限制电流)起主要作用. 分析数据得到平衡时的电子浓度为  $1.1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  和位于  $E_c - 0.363 \text{eV}$  的陷阱能级. 测量空间电荷限制电流可以用来研究宽带隙化合物非晶半导体 GaN 的深能级性质.

**关键词:** 非晶; GaN; 空间电荷限制电流; 缺陷

**PACC:** 7360N; 7340S; 7155

**中图分类号:** O472

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)S0-0113-04

## 1 引言

GaN 具有禁带宽度大、热导率高、电子饱和漂移速度大、临界击穿电压高和介电常数小等特点, 在高亮度发光二极管、短波长激光二极管等领域有着广泛的应用前景, 倍受人们关注<sup>[1,2]</sup>. 但是 GaN 体单晶制备的困难以及宽禁带半导体中的自我补偿趋势, 导致 GaN 层中存在大量的 N 空位和 Ga 空位等点缺陷<sup>[3]</sup>, 促使人们探索一种新型的宽带隙半导体材料.

近年来, Stumm 和 Drabold<sup>[4]</sup> 通过近似 *ab initio* 分子动力学理论计算指出 a-GaN 可能会成为一种新的宽带隙光电子器件材料, 因为它具有大的光学带隙 (2.8 eV) 和低的带间缺陷态密度. Nonomura 小组<sup>[5,6]</sup> 通过反应溅射得到光学带隙高达 3.9 eV 的透明薄膜, 电子自旋共振和 PDS 测量证实其带间缺陷态密度较低, 并观察到了 a-GaN 基薄膜晶体管的应用. Honda 等人<sup>[7]</sup> 利用 CS-MBE 制备的 a-GaN 制成 ELDs, 电致发光测量结果表明 a-GaN 是一种合适的光发射器件材料, 可用于大面积、低成本的系统制备如平板显示.

本文利用磁控溅射制备了 p-Si 衬底上的 a-GaN 薄膜, 基于 *I-V* 测量的数据分析得到 *I-V* 特性可能的主要导电机理是空间电荷限制电流, 并得到平衡时的电子浓度为  $1.1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  和位于  $E_c - 0.363 \text{eV}$  的陷阱能级.

## 2 实验

用磁控溅射的方法在经标准工艺清洗的 p 型 Si

衬底上制备了样品, 99.999% 的金属镓作为镓源, 99.999% 的高纯氮气作为反应溅射的氮源, 衬底生长温度为 500°C, 溅射功率为 50W, 背景真空为  $2.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ , 溅射时真空为 5.1Pa, 溅射时间为 1h. 0.5 μm 厚的 Al 通过孔洞面积为  $4.9 \times 10^{-8} \text{m}^2$  的模板真空蒸发沉积到 GaN 膜表面. 在 Al 蒸发前, 样品先后用丙酮和酒精进行 30°C 15min 的超声清洗, 然后吹干. 用 XRD 研究沉积薄膜的结构. *I-V* 特性是用 ASMEC-02 半导体测量系统测量的, 温度为 300~480K.

## 3 结果与讨论

图 1 没有出现任何晶体 GaN 衍射峰, 表明薄膜结构是非晶的. 图 2 是样品在 300K 时的稳态 *I-V* 特性曲线. 由其正向的半对数 *I-V* 曲线(图 3)可以看出 Al 与 GaN 的接触偏离了理想的 Schottky 二极管接触, 只是在非常小的电压下存在一个线性区. 假设这个区可以用热电子发射理论来描述, 其理想的 *I-V* 曲线有如下的形式<sup>[8]</sup>:  $I \propto \exp(qV/nkT)$ , 其中  $q$  是电子电量,  $k$  是 Boltzmann 常数,  $n$  是理想因子,  $T$  是二极管的绝对温度, 则二极管的理想因子  $n$  通过线性拟合和大于 7, 这个值没有落在可能的  $n$  的取值范围 1~2. 在电压大于 1.20V 以后,  $\lg I-V$  曲线不再是线性的, 串联电阻效应支配着电流传输过程, 则有:  $I = I_s \exp(q(V - IR_s)/nkT)$ , 其中  $I_s$  是反向偏压饱和电流,  $R_s$  是串联电阻. 从图 3 可以看出曲线并不能被  $I \propto \exp(q(V - IR_s)/nkT)$  描述, 在大电压下拟合较好, 小电压下偏离较大, 热电子发射不是 GaN 肖特基二极管主要的电流传输机制.

<sup>†</sup> 通信作者. Email: xieeq@lzu.edu.cn, zhangzhx2004@st.lzu.edu.cn  
2005-10-30 收到

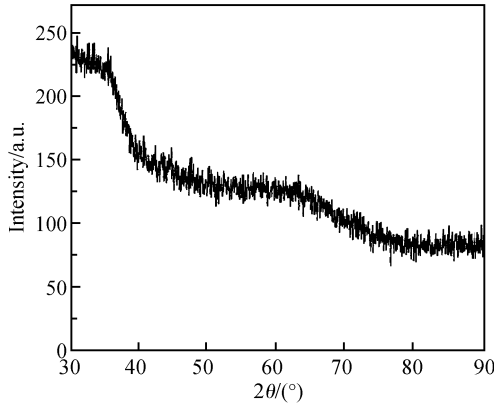


图 1 Si 衬底上薄膜 GaN 的 XRD 图

Fig.1 X-ray diffraction spectrum of the amorphous GaN on Si

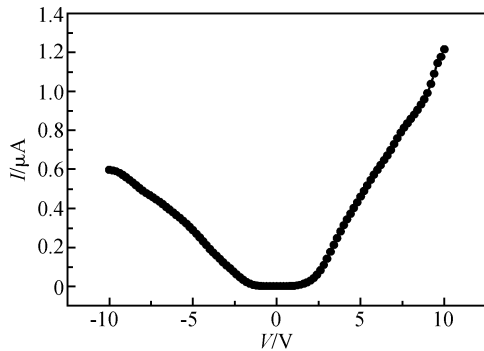


图 2 GaN 肖特基二极管线性的电流-电压特性

Fig.2 Linear of current-voltage characteristics of GaN Schottky diodes

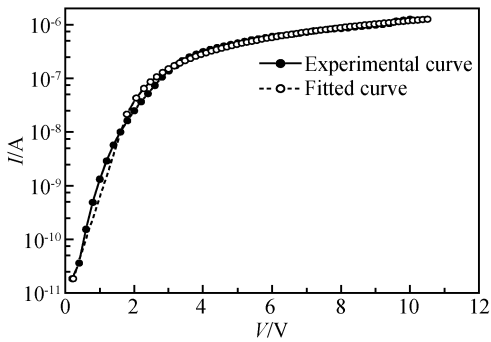


图 3 GaN 肖特基二极管的半对数实验和拟和正向电流-电压曲线

Fig.3 Semilogarithmic plots of experimental and fitted forward  $I$ - $V$  characteristics for the GaN Schottky diodes

但是在对数坐标下曲线(图 4)的一些行为可以用空间电荷限制电流(SCLC)来解释.在低电压下出现欧姆性电导;当电压大于 0.4V 时,电流增大得很快,有  $I \propto V^4$ ,表明在禁带中有缺陷态的分布.在 3.80V 之后,曲线斜率为 1.40,接近于 2.0,说明所

有的缺陷态已经被电子填满,电流很快地达到理想 SCLC 的值.这些现象说明了 SCLC 是主要的电导机制.

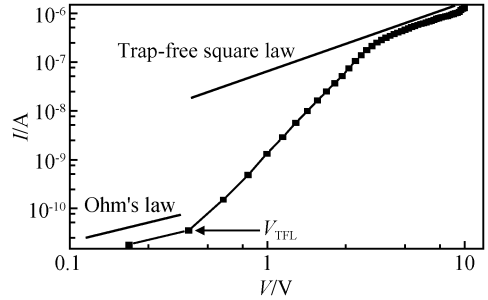


图 4 GaN 肖特基二极管正向电流-电压对数曲线 正向偏压下的行为暗示着空间电荷限制电流电导.

Fig.4 Logarithmic plots of the forward characteristics for the GaN Schottky diodes The behavior under forward bias is suggestive of space-charge-limited current conduction.

对于固体尤其是绝缘体中的单一能量分布陷阱能级的 SCLC 电导,Lampert 和 Mark<sup>[9]</sup>有过详细的描述.但是有文献报道<sup>[10,11]</sup>在一些半导体材料的 SCLC 导电机理中存在两个能量分布在  $E_1$  和  $E_2$  ( $E_1 < E_F < E_2$ )附近的陷阱能级.在这种情况下,电流遵从欧姆定律的低电压区到第一个 TFL(trap-filling-limited)电压(相应地, $E_1$ 附近陷阱被填满),如果发生在  $V_{TFL}$  的电流突变能够用指数函数  $I \propto e^{qV/nkT}$  来表示,则  $V_{TFL}$  可以由下式得到: $V_{TFL} \cong qP_{10} L^2 / \epsilon \epsilon_0$ <sup>[9]</sup>,其中  $P_{10}$  是二极管激活区陷阱的空穴占有率, $L$  是激活区的厚度, $q$  是电子电量, $\epsilon$  是介电常数, $\epsilon_0$  是真空介电常数.这种情况( $E_1 < E_F < E_2$ )对深能级缺陷态  $E_1$  仅能得到其上未占据态的浓度  $P_{10}$ <sup>[10]</sup>.热平衡时载流子浓度  $n_0$  通过下式给出: $J_{\Omega} = n_0 q \mu V / L$ ,其中  $J_{\Omega}$  是欧姆区的电流密度, $\mu$  是电子的迁移率.从计算得到的  $n_0$  值由关系式  $n_0 = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$  可以得到热平衡费米能级的位置.计算时取  $\epsilon = 9.8, \mu = 340 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ,激活区厚度  $L$  取为薄膜的厚度  $0.5 \mu\text{m}$ ,则有:  $V_{TFL} \cong 0.40 \text{ V}, n_0 = 1.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}, P_{10} = 8.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,热平衡费米能级位于导带底  $E_C$  下  $0.86 \text{ eV}$ .

图 5 是一组随温度变化的  $I$ - $V$  曲线.可以看出二次方律区域在所有的测量温度下均出现了.对每一个观察到的二次方律区域作  $\ln I \propto 1/T$  关系曲线(见图 6,电压  $V$  为常数)<sup>[11]</sup>,得到相应的缺陷态  $E_2$  的能级位置为  $E_C - 0.363 \text{ eV}$ .对  $340^\circ\text{C}$  生长的 GaN 薄膜进行了同样的测试,并没有观测到  $0.364 \text{ eV}$  的陷阱能级.可以看出沉积温度决定着陷阱的能级位置和密度,表明陷阱中心可能是由于大尺寸无序如

内应力造成的晶体的不完美,或者由化学配比偏差造成的本征点缺陷形成的.

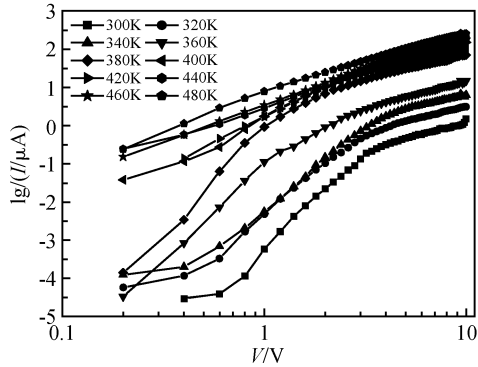


图5 GaN肖特基二极管电流-电压随温度的变化曲线

Fig. 5 Current-voltage characteristics of the GaN Schottky diodes as a function of temperature

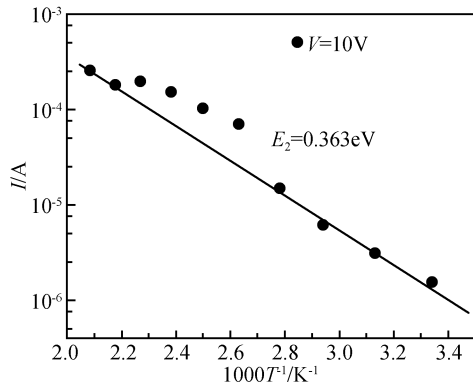


图6 由图5得到的恒压下的  $I - T^{-1}$  关系曲线

Fig. 6  $I$  versus  $T^{-1}$  with constant voltage (obtained from Fig. 5)

## 4 结论

本文分析了直流磁控溅射制备的 GaN 肖特基二极管  $I-V$  特性,正向偏压的对数  $I-V$  曲线特征表明 GaN 肖特基二极管电流输运中起主要作用的是

空间电荷限制电流,预期的热电子发射被 SCLC 抑制.对观察到的二次方律区作  $\ln I \propto 1/T$  (电压  $V$  恒定) 曲线得到位于导带底下  $0.363\text{eV}$  的陷阱能级,这可能是由于大尺寸无序如内应力造成的晶体的不完美,或者由化学配比偏差造成的本征点缺陷形成的. SCLC 是一种有效地研究宽带隙非晶 GaN 薄膜深能级性质的技术.

## 参考文献

- [1] Pearton S J, Ren F, Zhang A P, et al. Fabrication and performance of GaN electronic devices. *Mater Sci Eng R*, 2000, 30:55
- [2] Pearton S J, Ren F. GaN electronics. *Adv Mater*, 2000, 12 (21):1571
- [3] Fang Z Q, Look D C, Kim W. Deep centers in n-GaN grown by reactive molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(18):2277
- [4] Stumm P, Drabold D A. Can amorphous GaN serve as a useful electronic material. *Phys Rev Lett*, 1997, 79(4):677
- [5] Nonomura S, Kobayashi S, Gotoh T, et al. Photoconductive a-GaN prepared by reactive sputtering. *J Non-Cryst Solids*, 1996, 198~200:174
- [6] Kobayashi S, Nonomura S, Ohmori T, et al. Optical and electrical properties of amorphous and microcrystalline GaN films and their application to transparent TFT. *Appl Surf Sci*, 1997, 113/114:480
- [7] Hondal T, Inao Y, Konno K, et al. Amorphous GaN-based electroluminescent devices operating in UV spectral region. *Phys Status Solidi C*, 2002, 0(1):29
- [8] Wu C I, Kahn A, Wickenden A E, et al. Aluminum, magnesium, and gold contacts to contamination free n-GaN surfaces. *J Appl Phys*, 2001, 89(1):425
- [9] Lampertand M A, Mark P. *Current injection in solids*. New York: Academic, 1970
- [10] Rizzo A, Micocci G, Tepore A. Space-charge-limited currents in insulators with two sets of traps distributed in energy: theory and experiment. *J Appl Phys*, 1977, 48(8):3415
- [11] Vesely J C, Shatzkes M, Burkhardt P J. Space-charge-limited current flow in gallium nitride thin films. *Phys Rev B*, 1974, 10(2):582

## Space-Charge-Limited Current Properties of Amorphous GaN Thin Films

Zhang Zhenxing, Xie Erqing<sup>†</sup>, Pan Xiaojun, Jia Lu, and Han Weihua

(School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Amorphous GaN thin films are deposited on silicon substrates by magnetron sputtering. The current-voltage characteristics of the GaN Schottky diodes cannot be understood in terms of thermionic emission simply by including the effects of a series resistance and recombination current, which suggests that other current transport mechanism (space charge limited current, SCLC) is dominant. Analysis of the data indicates an equilibrium electron concentration of  $1.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  and a trap located 0.363 eV below the conduction band edge. SCLC measurements may be used to probe the properties of deep levels in the wide bandgap amorphous GaN.

**Key words:** amorphous; GaN; SCLC; defects

**PACC:** 7360N; 7340S; 7155

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0113-04

---

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: xieeq@lzu.edu.cn, zhangzhx2004@st.lzu.edu.cn

Received 30 October 2005