

AlGaIn/AlN/GaN 高电子迁移率器件的电容 电压特性的经验拟合*

王鑫华 赵 妙 刘新宇[†] 蒲 颜 郑英奎 魏 珂

(中国科学院微电子研究所, 微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

(2010年6月22日收到; 2010年7月19日收到修改稿)

利用蓝宝石衬底的 AlGaIn/AlN/GaN 高电子迁移率器件 (HEMT) 的电容电压 ($C-V$) 特性, 对电子费米能级与二维电子气面密度的经验关系进行表征, 其结果对器件电荷控制模型的建立, 跨导及电容表达式的简化有重要意义. 文章创新性地提出参数 α 用于表征二维势阱对沟道电子限制能力, 并认为 α 越小则二维势阱的沟道电子限制能力越强. 利用上述经验关系来拟合电容, 可以获得与实测电容很好的一致性.

关键词: HEMT, 费米能级, $C-V$ 特性, 二维势阱的电子限制能力

PACS: 71.10.Ca, 73.40.Kp

1. 引言

GaN 高电子迁移率器件 (HEMT) 在近 20 年经历了快速的发展, 其展现出了出色的射频性能, 并且其输出功率比传统的基于 GaAs 和 InP 技术的器件的输出功率高出一个数量级^[1]. 这吸引了越来越多的研究者来研究并提高它的性能. AlGaIn/AlN/GaN 异质结 HEMT 是近几年采用的新异质结构 HEMT^[2-4], 深刻的理解器件的电流电压特性 ($I-V$)、电容电压特性 ($C-V$) 对材料结构设计、器件结构设计和器件建模有很大帮助^[5-11]. 早在 80 年代研究 GaAs HEMT 时, Delagebeaudeuf 等人通过泊松方程、电流连续性方程、薛定谔方程等公式建立了 GaAs HEMT 的电荷控制模型^[12], 之后又模拟了 $I-V$ 特性及 $C-V$ 特性^[13]. Frank 等人考虑了与电子能级水平密切相关的各种敏感参数 (包括 GaAs 中的受主掺杂水平、异质结势垒高度、有效电子质量、介电常数的不连续性、界面浓度梯度、环境温度等), 获得 77 与 300 K 下电子费米能级与二维电子气 (2DEG) 面密度的经验关系, 这将简化 $I-V$ 特性、 $C-V$ 特性的拟合, 推动大信号模型的建立^[14]. 之后, 利用电子费米能级与 2DEG 面密度的关系, 建立并简化电容模型,

变成一种有效的途径^[15-19].

本文基于实验测得的器件 $C-V$ 特性, 运用数值方法获得电子费米能级与 2DEG 面密度的关系图, 然后在前人的基础上提出合理的拟合公式对此进行表征, 从而获得电子费米能级与 2DEG 面密度的经验表达式, 并用此经验关系拟合 $C-V$ 曲线.

2. 器件制备与测量

器件的外延材料用 MOCVD 生长, 材料结构自上而下为 AlGaIn 势垒层、AlN 插入层、GaN 缓冲层、AlN 层、 $\Phi 2$ Inch 的蓝宝石衬底. AlGaIn 势垒层的铝组分为 0.25. 器件重要工艺步骤包括标记、欧姆接触、淀积钝化层、注入隔离、刻蚀、肖特基接触、布线金属、电镀空气桥等. 欧姆接触的合金结构为 Ti/Al/Ni/Au, 金属蒸发后在 870°C N₂ 中快速退火 50 s. 用 PECVD 淀积钝化层 SiN, 注入隔离采用氮注入. 用传输线方法 (TLM) 测得比接触电阻率为 $\sim 10^{-6}$ Ωcm^2 . 光刻金属栅, 显影后注意用 Matrix 打底胶. 用 ICP 刻蚀栅孔, 用 HCL/H₂O₂/H₂O 溶液仔细清洗栅表面, 并蒸发栅金属 Ni/Au. 之后蒸发布线金属用于键合, 电镀空气桥, 用于源金属之间的连接. 器件栅长 0.3 μm , 单个栅宽 100 μm , 源漏间距 4.5 μm . 圆形

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327500), 国家自然科学基金 (批准号: 60976059, 60890191) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xyliu@ime.ac.cn

肖特基二极管 PCM 图形的栅直径为 100 μm .

C - V 测量使用 HP4284A LCR 表,用安捷伦 VEE 语言编制的自动测试程序自动控制 and 读取 C - V 数据. LCR 表的测量范围从 20 Hz 到 1 MHz. C - V 测量时叠加的交流信号幅度为 0.05 V,扫描电压时电压范围为 (-3 V, 0.5 V),扫描频率为 1 MHz. 由于短栅长器件的栅边缘电容等对 HEMT 栅肖特基电容的测量有一定影响^[7,20,21],要获得相对准确的栅肖特基电容则需要测量大尺寸的圆形二极管.

3. 分析与拟合

对 HEMT C - V 特性进行拟合,通常需要找到材料三角势阱中费米能级水平相对于异质结界面导带底尖峰的电势差 E_F (如图 1 所示)与 2DEG 面密度 n_s 之间的关系^[22]. 理论上需要考虑电子与电子的相互作用关系,并结合异质结势垒电势,运用严格的泊松方程和薛定谔方程进行自洽求解^[22],进而获得 C - V 特性曲线. 另外,通过实测的 C - V 曲线也可以获得 $E_F \propto n_s$ 的经验表达式,该表达式对器件电荷控制模型的建立^[17,23]、跨导的计算^[18,24]、噪声系数的计算^[25,26]、电容模型的简化^[16,18,22]、器件仿真^[22] 有重要参考作用.

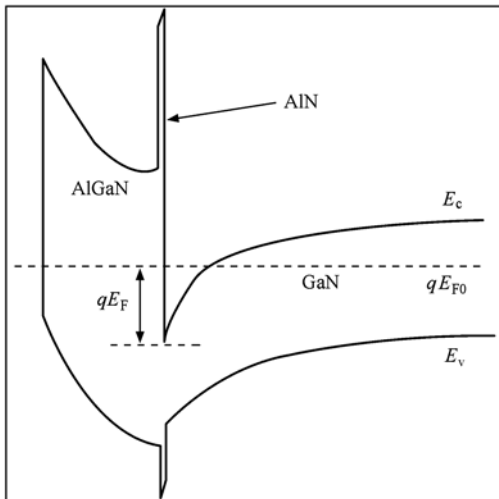


图 1 AlGaIn/AlN/GaN 异质结能带图 (E_c, E_v 分别为导带底与价带顶能级, qE_{F0} 为电子费米能级)

未故意掺杂的 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 单位面积肖特基电容 C_s ^[12,22] 则可表达为

$$C_s = (C_{\text{AlGaIn}}^{-1} + C_{\text{AlN}}^{-1})^{-1} \left(1 - \frac{dE_F}{dV_g} \right)$$

$$= (C_{\text{AlGaIn}}^{-1} + C_{\text{AlN}}^{-1})^{-1} \left(1 - \frac{dE_F}{qdn_s} \cdot \frac{qdn_s}{dV_g} \right)$$

$$= (C_{\text{AlGaIn}}^{-1} + C_{\text{AlN}}^{-1})^{-1} \left(1 - \frac{dE_F}{qdn_s} \cdot C_s \right), \quad (1)$$

其中, n_s 为 2DEG 面密度, $C_{\text{AlGaIn}}, C_{\text{AlN}}$ 分别为 AlGaIn 层与 AlN 层的单位面积电容.

势垒层电容可以表示为

$$C_{\text{barrier}} = (C_{\text{AlGaIn}}^{-1} + C_{\text{AlN}}^{-1})^{-1} = \frac{\epsilon_{\text{eff}}}{d_{\text{AlGaIn}} + d_{\text{AlN}}}, \quad (2)$$

其中, ϵ_{eff} 为势垒层等效介电常数, $d_{\text{AlGaIn}}, d_{\text{AlN}}$ 分别为 AlGaIn 层与 AlN 层厚度.

结合(1),(2)式可以得到

$$C_s = \frac{\epsilon_{\text{eff}}}{d_{\text{AlGaIn}} + d_{\text{AlN}} + \Delta d}. \quad (3)$$

其中,

$$\Delta d = \frac{\epsilon_{\text{eff}}}{q} \cdot \frac{dE_F}{dn_s}, \quad (4)$$

为有效沟道宽度,表示 2DEG 距离异质界面的有效位置.

处理 GaAs HEMT 的有效沟道宽度时,研究者采用了 GaAs 的 E_F - n_s 经验公式^[16,22],其在 300 K 时的表达式为 $E_F/\text{meV} = 234.5 (n_s/10^{12} \text{ cm}^{-2})^{1/3} - 155$ (300 K), 在 77 K 时 $E_F/\text{meV} = 97.6 (n_s/10^{12} \text{ cm}^{-2})^{2/3}$ (77K). 也可以借鉴这种处理方法对电容进行数值拟合. 但目前还没有关于 AlGaIn/AlN/GaN 异质结构的 E_F - n_s 经验公式. 对于 GaAs 材料, Stern^[14] 等人在综合考虑多种影响电子能级的参数后获得 AlGaAs/GaAs HEMT 的 E_F - n_s 关系图,其经验表达式是 $E_F \propto n_s^{1/3}$; Shey^[19] 及 Ando 等人^[19,26] 利用三角阱近似模型拟合 E_F - n_s 的经验关系,并认为该经验关系在阈值电压两边区域是不一样的,其经验表达式是 $E_F \propto n_s^{2/3}$; Tong 等人^[27] 提出的经验表达式在亚阈值附近获得了很好的近似度,但在高面密度时背离数值求解的曲线,其经验表达式是 $E_F \propto n_s + n_s^{-1}$. 这些经验表达式被后人广泛采用,应用于器件电荷控制模型的推导、器件电容模型的建立和软件数值模拟.

仔细观察(4)式,若能获得 Δd 与 n_s 的关系,则 E_F - n_s 关系不难获得. n_s 可以通过

$$n_s = \int_{-\infty}^{\infty} N_{\text{cv}}(w) dw, \quad (5)$$

获得^[9],其中 $N_{\text{cv}}(w)$ 为外观载流子浓度, w 为耗尽深度. 根据耗尽层模型可知, $w = d_{\text{AlGaIn}} + d_{\text{AlN}} + \Delta d$, 那么通过对(4)式的积分可以获得 $E_F \sim n_s$ 的关系

式,即

$$\frac{\mathcal{E}_{\text{eff}}}{q} \int_0^{E_F} dE_F = \int_{n_{s0}}^{n_s} (\Delta d) dn_s, \quad (6)$$

其中, n_{s0} 表示电子费米能级与异质界面的 GaN 导带底尖峰相交时 ($E_F = 0$) 的 2DEG 面密度, 此时 GaN 导带底电子浓度为 $2.53 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

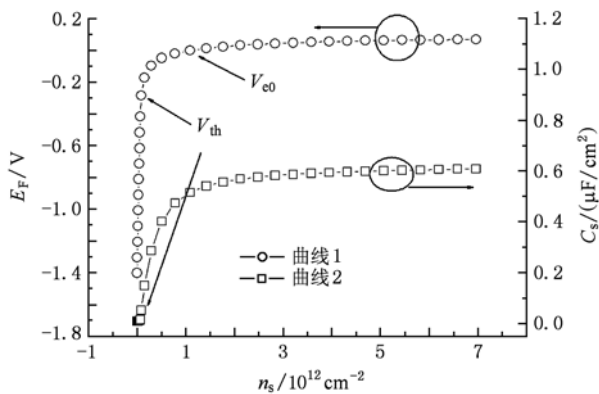


图2 300 K 时 AlGaIn/AlN/GaN 结构的 E_F-n_s 关系图(曲线1) 及 $C-n_s$ 关系图(曲线2)

图2 为计算获得的 300 K 时 AlGaIn/AlN/GaN 结构的 E_F-n_s 关系图及 $C \sim n_s$ 关系图. 该图是由测量频率为 1 MHz 的圆形肖特基二极管 $C-V$ 曲线计算而得. 从大量报道中可知 1 MHz 的测量频率能有效减小缺陷对 $C-V$ 曲线的影响^[21,28]. 从曲线2 中可以获得阈值电压 V_{th} 对应于曲线1 的位置. 在阈值电压附近, 沟道中的电子浓度很低, 电子分布到 GaN 缓冲层中导致有效沟道宽度增大和电容减小^[22]. 定义 $E_F = 0$ 时的栅电压为 V_{e0} , 将 E_F-n_s 曲线分为3 段, 分界点分别为 V_{th} 和 V_{e0} . 研究发现, 当栅电压小于阈值电压 V_{th} 时, E_F 与 n_s 成线性关系; 当栅电压大于 V_{e0} 时, E_F 与 n_s 的关系与 GaAs HEMT 的情况类似, 基本成定指数关系; 当栅电压介于 V_{th} 和 V_{e0} 之间时, E_F 随 n_s 的变化没有明显规律, 但仍采用 $E_F \propto n_s^\alpha$ 的表达式拟合, 其中 α 为 n_s 的函数. 由此获得 E_F-n_s 拟合的公式如下:

$$E_F = \begin{cases} 0.19179 \times (n_s/10^{12})^{0.16} - 0.18626, & (V_g > V_{e0}), \\ 0.49222 \times (n_s/10^{12})^{[0.16987 + \exp(-17.81312 \times (n_s/10^{12}))]}, & (V_{th} \leq V_g \leq V_{e0}), \\ -0.49007, & (V_{th} \leq V_g \leq V_{e0}), \\ 14.1773 \times (n_s/10^{12}) - 1.38932, & (V_g < V_{th}), \end{cases} \quad (7)$$

其中, E_F 的单位为 V, n_s 的单位为 cm^{-2} , V_g 为栅电

压. 拟合时发现, 当指数 α 选取 $a + \exp(-b \cdot (n_s/10^{12}))$ 的表达式时, E_F-n_s 过渡段的拟合效果最好, 其中 a, b 为待定系数.

定义 α 为表征二维势阱对沟道电子限制能力的参数. α 越小, 则二维势阱对沟道电子的限制能力越强, 反之则反. 从(7)式可以看出, 当费米能级位于 AlN/GaN 导带底尖峰之上时, $\alpha = 0.16$, 这与电子受限于二维势阱有关, 电子面密度一般大于 10^{12} cm^{-2} ; 当栅电压低于阈值电压时, $\alpha = 1$, 二维势阱展宽严重, 电子基本不能限制在势阱中, 量子机械效应将不重要^[22]; 当栅电压从阈值电压开始增大时, 指数 α 逐渐减小, 表明二维势阱限制电子的能力逐渐增加. 二维势阱对电子的限制能力越强可以理解为沟道中电子群距异质界面的平均距离越小. 研究发现相同温度下电子群距异质界面的平均距离随 2DEG 面密度的增加而减小^[14,29]. 这与文中参数 α 所反映的规律一致. 而 GaAs/AlGaAs HEMT 在小栅压附近的参数 α 约为 1/3, 略高于 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 的参数 α , 这可能是后者二维势阱的沟道电子限制能力强于前者的一种表现. Ando 等人^[18]的实验发现缓冲层掺杂对 E_F-n_s 关系基本没有影响, 而与异质结导带不连续度有关, 这从侧面印证了指数 α 表征二维势阱对沟道电子限制能力的可行性, 并且可能与异质结导带不连续度有关.

最后利用(3), (4), (7)式对电容进行计算, 计算结果与原始实验曲线非常接近, 如图3 所示, 这说明 E_F-n_s 的经验表达式可以作为真实关系的良好近似.

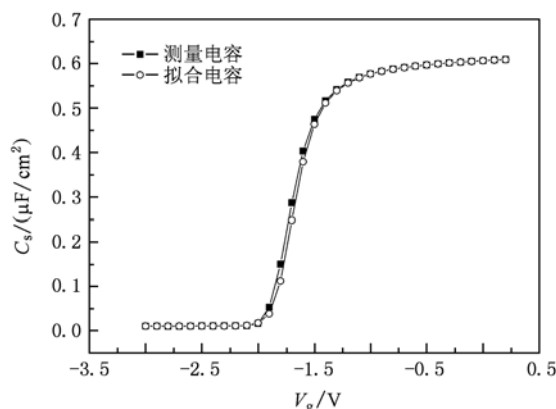


图3 测量电容(方形)与拟合电容(圆形)的比较

4. 结 论

文章从高电子迁移率器件的肖特基电容表达

式入手,结合测量的 C - V 曲线,给出了推算 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 的 $E_F \sim n_s$ 经验表达式的一种方法.将该表达式代入电容计算式,获得与实测曲线很好的一致性.文中创新性地提出表征二维势阱对沟道电子限制能力的参数 α , α 越小说明势阱限制能力越强,且参数 α 可能与异质结导带不连续度有关. $E_F \sim n_s$ 经验表达式为插 AlN 结构的 GaN HEMT 器

件分析和建模提供了支持,它将有利于简化电容模型、跨导模型等.

感谢测试部门工程师欧阳思华编写的 CV 数据自动采集软件,感谢工程师李艳奎对 CV 测试系统的维护.感谢中国科学院半导体研究所提供的外延片.

- [1] Jimenez J L, Chowdhury U 2008 *IEEE 46th Annual International Reliability Physics Symposium* Phoenix, USA, APR 27-MAY 01, 2008 p429
- [2] Guo L, Wang X, Wang C, Xiao H, Ran J, Luo W, Wang X, Wang B, Fang C, Hu G 2008 *Microelectronics Journal* **39** 777
- [3] Lisesivdin S B, Balkan N, Makarovskiy O, Patane A, Yildiz A, Caliskan M D, Kasap M, Ozcelik S, Ozbay E 2009 *Journal of Applied Physics* **105** 6
- [4] Qian F, Leach J H, Jinqiao X, Ozgur U, Morkoc H, Zhou L, Smith D J 2009 *Proceedings of the International Society for Optical Engineering* San Jose, USA, January 26—29, 2009 p14
- [5] Kumar S P, Agrawal A, Kabra S, Gupta M, Gupta R S 2006 *Microelectronics Journal* **37** 1339
- [6] Farahmand M, Garetto C, Bellotti E, Brennan K F, Goano M, Ghillino E, Ghione G, Albrecht J D and Ruden P P 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 535
- [7] Parvesh G, Sujata P, Subhasis H, Mridula G, Gupta R S 2007 *Microelectron. J.* **38** 848
- [8] Liu J, Hao Y, Feng Q, Wang C, Zhang J C, Guo L L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3483 (in Chinese) [刘杰,郝跃,冯倩,王冲,张进城,郭亮良 2008 物理学报 **56** 3483]
- [9] Zhang J F, Wang C, Zhang J C, Hao Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 1060
- [10] Zhang J F, Zhang J C, Hao Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1334
- [11] Wang X H, Zhao M, Liu X Y, Pu Y, Zheng Y K, Wei K 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097302
- [12] Delagebeaudeuf D, Linh N T 1982 *IEEE Transactions on Electron Devices* **29** 955
- [13] Aziz M A, El-Banna M 1996 *Thirteenth National Radio Science Conference* Cairo, Egypt, March 19—21, 1996 p547
- [14] Frank S, Sankar D S 1984 *Phys. Rev. B* **30** 840
- [15] Norris G B, Look D C, Kopp W, Klem J, Morkoc H 1985 *Appl. Phys. Lett.* **47** 423
- [16] Kwangman P, Hong Bae K, Kae Dal K 1987 *IEEE Transactions on Electron Devices* **34** 2422
- [17] Cazaux J L, Ng G I, Pavlidis D, Chau H F 1988 *IEEE Transactions on Electron Devices* **35** 1223
- [18] Ando Y, Itoh T 1988 *IEEE Transactions on Electron Devices* **35** 2295
- [19] Shey A J, Ku W H 1988 *IEEE Electron Device Letters* **9** 624
- [20] Kokorev M F, Maleev N A 1996 *Solid-State Electronics* **39** 297
- [21] Liu W L, Chen Y L, Balandin A A, Wang K L 2006 *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* **1** 258
- [22] Moloney M J, Ponce F, Morkoc H 1985 *IEEE Transactions on Electron Devices* **32** 1675
- [23] Karmalkar S 1997 *IEEE Transactions on Electron Devices* **44** 862
- [24] Ketterson A A, Morkoc H 1986 *IEEE Transactions on Electron Devices* **33** 1626
- [25] Anwar A F M, Liu K W 1993 *IEEE Transactions on Electron Devices* **40** 1174
- [26] Ando Y, Itoh T 1990 *IEEE Transactions on Electron Devices* **37** 67
- [27] Tong K Y 1991 *Electronics Letters* **27** 668
- [28] Miller E J, Dang X Z, Wieder H H, Asbeck P M, Yu E T, Sullivan G J, Redwing J M 2000 *Journal of Applied Physics* **87** 8070
- [29] Khondker A N, Anwar A F M, Islam M A, Limoncelli L, Wilson D 1986 *IEEE Transactions on Electron Devices* **33** 1825

The experiential fit of the capacitance-voltage characteristics of the AlGa_N/Al_N/Ga_N high electron mobility transistors^{*}

Wang Xin-Hua Zhao Miao Liu Xin-Yu[†] Pu Yan Zheng Ying-Kui Wei Ke

(Key Laboratory of Microelectronics Device & Integrated Technology, Institute of microelectronics
of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 22 June 2010; revised manuscript received 19 July 2010)

Abstract

This paper expresses the experiential relationship between Fermi level and the density of two-dimensional electron gas, based on the capacitance voltage (C - V) characteristics of the AlGa_N/Al_N/Ga_N high electron mobility transistor (HEMT) on sapphire substrate. The expression provides important references for establishing the device charge control model and simplifying the transconductance and capacitance. Parameter α is introduced for describing the ability for the two-dimensional potential well to restrict electrons, and we believe that the smaller the value of α , the stronger the restricting ability is. A coherent fitting effect, compared with the measurement, is obtained by making use of the experiential relationship said above.

Keywords: HEMT, Fermi level, C - V characteristics, the ability of restricting

PACS: 71.10.Ca, 73.40.Kp

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327500), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60976059, 60890191).

[†] Corresponding author. E-mail: xyliu@ime.ac.cn