

肖特基 C-V 法研究 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结 界面二维电子气*

周玉刚 沈波 刘杰 俞慧强 周慧梅 钱悦 张荣 施毅 郑有焯

(南京大学物理系, 南京 210093)

摘要: 通过对 $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 肖特基二极管的 C-V 测量, 研究分析了 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面二维电子气 (2DEG) 浓度及其空间分布. 测量结果表明, $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面 2DEG 浓度峰值对应的深度在界面以下 1.3nm 处, 2DEG 分布峰的半高宽为 2.3nm, 2DEG 面密度为 $6.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$. 与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结相比, 其 2DEG 面密度要高一个数量级, 而空间分布则要窄一个数量级. 这主要归结于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层中 ~ MV/cm 量级的压电极化电场和自发极化电场对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结能带的调制和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面有更大的导带不连续.

关键词: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结; 肖特基接触; 二维电子气

PACC: 7340N; 7280E; 7760

中图分类号: O485 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2001)11-1420-05

1 引言

众所周知, 化合物半导体异质结界面二维电子气 (2DEG) 的浓度及其分布, 直接影响基于异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 和异质结场效应晶体管 (HFET) 器件的性能. 过去对 III 族砷化物和磷化物异质结界面 2DEG 性质已研究得很多, 也比较清楚. 而 III 族氮化物是近年来兴起的宽带隙半导体材料, 被看作是发展短波长光电子器件以及高温、高频、大功率电子器件的最优选材料, 已成为当前国际研究热点^[1,2]. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结则是发展 III 族氮化物电子器件的最重要也是最基本的结构^[1,2]. 因此, 研究分析 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面 2DEG 的浓度及其分布, 对研究 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 体系 2DEG 输运性质以及发展 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结电子器件都有重要的意义. 近年来, 这方面的研究受到人们的关注, 已有些报道^[3].

本文报道用肖特基 C-V 法对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面 2DEG 浓度及其空间分布的研究分析. 结果表明, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面 2DEG 浓度比 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 中高一个量级, 空间分布则窄一个量级. 这可归因于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层中压电极化电场和自发极化电场对异质结能带的强烈调制以及 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面较大的导带不连续.

2 实验

研究中使用的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结采用金属有机化学气相沉积方法在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 衬底上生长. $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层厚度为 45nm, GaN 层厚度为 2.1 μm . 其中, GaN 层为非故意掺杂 n 型, 背景载流子浓度为 $(1-2) \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层采用调制掺杂结构. 表面为 25nm n 型 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层, 掺杂浓度约为 $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, n 型 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层之

* 国家重点基础研究专项基金 (G20000683), 国家自然科学基金 (69806006, 69976014 及 69987001), 国家“八六三”高技术研究发展计划基金资助.

周玉刚 男, 1975 年出生, 博士研究生, 从事 III-V 族材料生长、物性表征、器件工艺与器件物理研究.

沈波 男, 1963 年出生, 教授, 从事半导体材料生长、物性表征与器件研制.

2001-01-16 收到, 2001-03-21 定稿

©2001 中国电子学会

下为 20nm 未掺杂 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层.

欧姆接触和肖特基接触分别采用 $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Pt}/\text{Au}$ (15nm/100nm/40nm/200nm) 多层金属和 Pt/Au (40nm/200nm) 双层金属, 金属用电子束蒸发方法沉积, 采用剥离工艺形成接触图形. 经过高纯 N_2 气氛下 880°C 退火, 欧姆接触的接触电阻率小于 $1 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 肖特基接触为直径 $400 \mu\text{m}$ 的圆点, 欧姆接触为与其同心的内外径分别为 300 和 $600 \mu\text{m}$ 的圆环.

肖特基 $I-V$ 特性采用 Keithley 2400 sourceme-ter 和 Keithley 2182 纳伏计测量.

图 1(a) 和(b) 分别是 300K 时肖特基二极管的正向和反向 $I-V$ 特性.

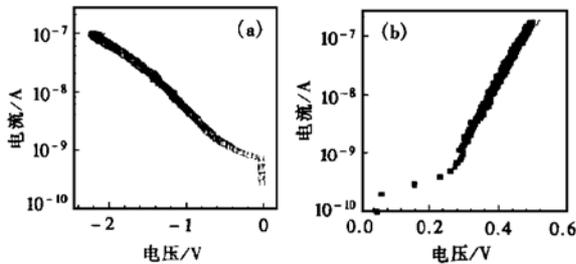


图 1 300K 时一典型 $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 肖特基二极管正向 (a) 和反向 (b) $I-V$ 特性曲线

FIG. 1 Forward (a) and Reverse (b) Current-Voltage Characteristics of a Typical $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ Diode

$C-V$ 特性用 HP4194 LCR 测量仪在 100kHz 条件下测量.

3 结果与分析

图 2 是 300K 时 $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 肖特基二极管的 $C-V$ 特性. 可以看到, 当所加的反向偏压较大的时候 ($C-V$ 曲线左部), 电容较小. 随着反向偏压的减小, 电容增加并且出现了一个电容的平台 ($C-V$ 曲线中部). 在 $C-V$ 曲线左部低平处和中部平台之间有一个过渡区, 在过渡区内电容随反向偏压的减小而迅速增加. 在平台的右边电容陡峭上升 ($C-V$ 曲线右部).

对于金属-半导体肖特基接触, 在一定的偏压下, 耗尽区从金属-半导体接触界面向半导体体内扩展, 一定的偏压对应一定的耗尽区宽度 z (亦即耗尽区边界离开表面的深度). 当叠加上一个小的交流电

压 ΔV 时, 电荷变化 ΔQ 主要发生在 z 附近, 从而近似地有

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGa}} A}{z}$$

或

$$z = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGa}} A}{C} \quad (1)$$

其中 A 为肖特基接触的面积; $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ C}/(\text{V} \cdot \text{cm})$; ϵ_{AlGa} 为 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 的相对介电常数.

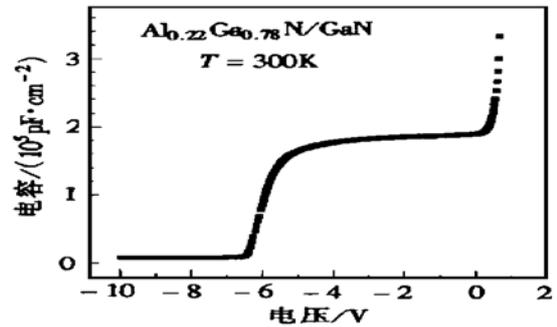


图 2 300K 时一个典型的 $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 肖特基二极管 $C-V$ 特性曲线

FIG. 2 Capacitance-Voltage Characteristics of a Typical $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ Diode at 300K

据 (1) 式, 在平台处对应的耗尽区宽度约 45nm, 即在异质界面附近. 在 $C-V$ 曲线左部及过渡区, 对应的耗尽区边界在 GaN 层内. $C-V$ 曲线右部陡峭上升部分对应的耗尽区边界在 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层内.

根据 $C-V$ 曲线, 可以求出深度 z 处对应的载流子浓度^[4].

$$N_{C-V} = - \frac{1}{e \epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGa}} A^2} \times \left[\frac{1}{\frac{dC^{-2}}{dV}} \right] \quad (2)$$

其中 $e = 1.6 \times 10^{19} \text{ C}$. 图 3 是根据 $C-V$ 曲线利用公式 (2) 计算得到的载流子浓度 (N_{C-V}) 分布图. 对应于 $C-V$ 曲线中电容的平台, 在载流子浓度分布图中有一个电子浓度的峰. 图中峰值浓度为 $1.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 峰值对应深度为 46.3nm, 峰的半高宽为 2.3nm. 这表明, 在 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质界面附近存在 2DEG. 对峰积分可以求得 2DEG 面密度为 $6.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. 肖特基 $C-V$ 方法得到的 2DEG 面密度比相同结构中霍尔测量的结果略小^[5]. 这是由于肖特基 $C-V$ 方法中肖特基势垒对载流子有一定的耗尽作用, 而且霍尔测量中还计入了非 2DEG

的体载流子的贡献. 2DEG 是由于 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面附近导带量子阱对电子的限制而形成的. 由于量子效应, 电子浓度峰值并不出现在异质结界面处, 而在界面以下 1.3nm 处.

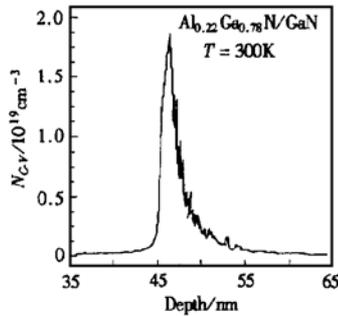


图 3 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结载流子浓度分布图
深度是指离开 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 表面的距离
FIG. 3 Carrier Concentration Profile in $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ Heterostructure

Kroemer 等人^[6]和 Ando 等人^[7]的实验和理论计算结果表明, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0.3$) 异质结中, 2DEG 浓度峰值的典型值为 $7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 峰的半高宽典型值为 20nm, 2DEG 面密度为 $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$. 可见, 与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结相比, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面 2DEG 面密度要高一个数量级, 而且其分布要窄一个数量级.

2DEG 面密度及其分布的差别, 主要是由异质结能带结构决定的. 从异质结能带结构上看, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 的主要差别在于, 由于压电效应^[8]和自发激化效应^[9], 在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层中存在 $\sim \text{MV}/\text{cm}$ 量级的压电极化电场和自发极化电场, 强烈地调制了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结的能带结构; 同时, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结的导带不连续 ΔE_c 更大. 下面分别讨论这两方面的影响.

图 4(a) 为样品结构示意图, (b) 为样品热平衡时能带图, (c) 为对应的电荷分布示意图. 其中 Φ_b 为肖特基势垒高度, E_{cm} 为界面处 GaN 导带底相对费米能级的深度; σ_{met} 、 σ_p 、 σ_{2DEG} 分别为金属-半导体界面处的电荷面密度、极化电荷面密度(包括压电极化和自发极化电荷)、2DEG 面密度; N_d^+ 为离化施主体密度.

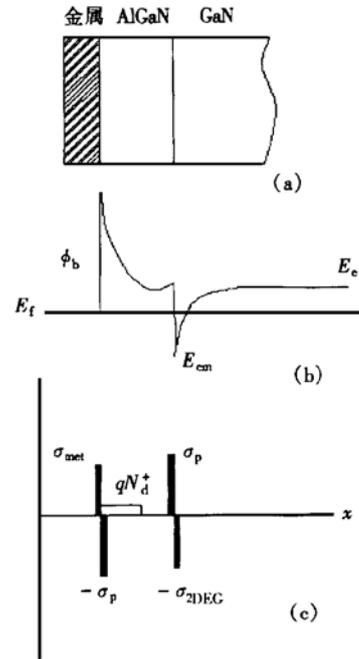


图 4 (a) $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 结构示意图; (b) $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 热平衡时能带图; (c) 为对应的电荷分布示意图

FIG. 4 Device Structure and Energy-Band Diagram of $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ ((a) and (b)); Charge Distribution Profile in $\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ Structure (c)

为简单起见, 我们考虑 AlGaN 层未掺杂时压电场对 2DEG 浓度的影响. 将 2DEG 近似看作是分布在异质结界面的面电荷, 则有

$$n_s = \sigma_p/e - (\epsilon_0\epsilon_{\text{AlGaN}}/de^2)(\Phi_b + E_{cm} - \Delta E_c) = (\epsilon_0\epsilon_{\text{AlGaN}}/de^2)(eF_p d + \Delta E_c - E_{cm} - \Phi_b) \quad (3)$$

其中 $F_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0\epsilon_{\text{AlGaN}}}$, 为极化场; $eF_p d$ 为极化场对 Al-GaN 能带的调制, 对 $d = 45\text{nm}$, 取 $F_p \approx 1\text{MV}/\text{cm}$, 则 $eF_p d \approx 4.5\text{eV}$, 比其余各项要大得多. 因此, 极化场对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 能带的调制诱导的 2DEG 面密度增加约为 $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$, 远比在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结中由导带不连续引起的 2DEG 面密度大.

同时, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结中 ΔE_c 比 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结中 ΔE_c 要大得多, 这也导致了 2DEG 浓度的增加.

2DEG 空间分布的变窄, 首先与 2DEG 的浓度增大有密切关系. 2DEG 浓度的增大, 导致界面附近 GaN 层内电场按比例增大, 即量子阱底部会变窄, 从而子能级离量子阱底的高度增加且波函数分布变

窄. 这与 Antoszewski 等人在研究 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ 调制掺杂场效应晶体管 2DEG 迁移率随浓度变化规律得到的结果是一致的^[10]. 另一方面, 压电场对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 能带的调制和 ΔE_c 的增加也意味着量子限制效应增强, 也直接导致 2DEG 分布变窄.

4 结论

$\text{Pt}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 肖特基二极管的 $C-V$ 测量表明异质结界面附近存在二维电子气. 通过 $C-V$ 特性分析求出了载流子浓度分布, 得到载流子浓度峰值对应的深度在界面以下 1.3nm 处, 载流子浓度分布半高宽为 2.3nm, 2DEG 面密度为 $6.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. 与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结相比, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结中 2DEG 面密度要高一个数量级, 而且其分布要窄一个数量级. 这主要归结于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层中存在 $\sim \text{MV}/\text{cm}$ 量级的压电极化电场和自发极化场对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结能带的调制和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结界面有更大的导带不连续.

致谢 感谢严峰博士、包鹏硕士在 $C-V$ 测量中提供

的帮助, 感谢徐庆宇博士在 $I-V$ 测量中提供的帮助.

参考文献

- [1] Q. Chen, J. W. Wang, R. Gaska, M. A. Khan, M. S. Shur, G. J. Sullivan, A. L. Sailor, J. A. Higgings, A. T. Ping and I. Asesida, IEEE Electron Device Lett., 1998, **19**: 44.
- [2] U. K. Mishra, Y. F. Wu, B. P. Keller, S. Keller and S. P. Denbaars, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1998, **46**: 756.
- [3] P. Ramvall, Y. Aoyagi, A. Kuramala, P. Hacke and K. Horino, Appl. Phys. Lett., 1999, **74**: 3866.
- [4] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger and J. Hilsenbeck, J. Appl. Phys., 1999, **85**: 3222.
- [5] B. Shen, T. Someya and Y. Arakawa, Appl. Phys. Lett., 2000, **76**: 2746.
- [6] H. Kroemer, W. Y. Chien, J. S. Harris, Jr and D. D. Edwall, Appl. Phys. Lett., 1980, **36**: 295.
- [7] T. Ando, J. Phys. Soc. Jpn., 1982, **51**: 3893.
- [8] A. Byhovski, B. Gelnont and M. Shur, J. Appl. Phys., 1993, **74**: 6734.
- [9] F. Bernardini and V. Fiorentini, Phys. Rev. B, 1997, **56**: 10024.
- [10] J. Antoszewski, M. Gracey, J. M. Dell, L. Faraone, T. A. Fisher, G. Parish, Y. F. Wu and U. K. Mishra, J. Appl. Phys., 2000, **87**: 3900.

Investigation on Two-Dimensional Electron Gas in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Heterostructures by Using Schottky $C-V$ Measurement*

ZHOU Yu-gang, SHEN Bo, LIU Jie, YU Hui-qiang, ZHOU Hui-mei, QIAN Yue,
ZHANG Rong, SHI Yi and ZHENG You-dou

(*Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract: Concentration and spatial distribution of the two-dimensional electron gas (2DEG) near the $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ heterointerface are investigated by using Schottky $C-V$ measurement. The peak value of the 2DEG concentration occurs at 1.3nm beneath the heterointerface. The full width at half maximum (FWHM) of the 2DEG peak is 2.3nm and the sheet density of the 2DEG is $6.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$. The sheet density of the 2DEG is one order higher and the FWHM is one order lower than those in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructures, because of the piezoelectrically induced polarization field in the order of $\sim \text{MV}/\text{cm}$, which will strongly modulate the conduction-band of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructure, as well as the much larger conduction-band discontinuity in the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterointerface.

Key words: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructure; Schottky contacts; two-dimensional electron gas

PACC: 7340N; 7280E; 7760

Article ID: 0253-4177(2001)11-1420-05

* Project Supported by Special Funds for Major State Basic Research Projects of China Under Grant No. G20000683, National Natural Science Foundation of China Under Grant Nos. 69806006, 69976014, and 69987001, and the National High Technology Research & Developments Project of China.

ZHOU Yu-gang male, was born in 1975, PhD candidate. He is primarily involved in growth, characterization, device technique and device physics of III-V materials.

SHEN Bo male, was born in 1963, professor. He is primarily involved in growth, characterization, device development of semiconductor materials.

Received 16 January 2001, revised manuscript received 21 March 2001

©2001 The Chinese Institute of Electronics