

AlGaIn/GaN HFET 中的陷阱位置和激活能

薛 舫 时[†]

(南京电子器件研究所, 单片集成电路与模块国家级重点实验室, 南京 210016)

摘要: 自洽求解薛定谔方程和泊松方程求出了异质结能带和沟道阱基态、激发态及二维表面态的波函数. 研究了表面陷阱位置及其激活能. 发现表面高密度缺陷减薄了势垒层, 显著增强了热电子隧穿过程. 从缺陷态发射电子和热电子隧穿构成的新陷阱模型出发, 解释了 HFET 的瞬态电流和产生-复合噪声. 最后讨论了改进材料生长和器件工艺来抑制陷阱效应, 改善器件性能途径.

关键词: AlGaIn/GaN 场效应管; 陷阱; 二维表面态; 表面缺陷; 热电子隧穿
EEACC: 7320C; 2550E; 2520D

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0418-04

1 引言

AlGaIn/GaN 异质结中存在 $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 量级的高密度位错. 这样高的位错密度为何能制成高性能的 HFET 一直是大家关心的一个不解之谜. 目前实验中测得的陷阱能级在导带底 1eV 以下. 按照一般的深能级理论, 陷阱发射和俘获电子的时间常数 τ 为:

$$\tau = \frac{1}{N_c \sigma v_{th}} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

式中 N_c 为陷阱浓度; σ 为陷阱的俘获截面; v_{th} 为电子的热速度; ΔE 为陷阱能级; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度. 如果取 $\Delta E = 1\text{eV}$, 则室温下指数因子为 6.3×10^{16} , 计算得到的时间常数高达 10^7 s . 实验值常常在 10^{-4} s 量级, 而且陷阱发射和俘获时间也不对称. 这些矛盾说明, 沟道中的电子并不直接同沟道中的深能级陷阱交换电子.

AlGaIn/GaN 异质结中的强极化电荷和高能带带阶产生势场陡变的量子阱. 沟道层、势垒层和缓冲层中的陷阱和沟道电子的能量差各不相同. 瞬态电流和噪声实验测得的激活能在 $0.3 \sim 0.4\text{eV}$ 范围内. 如果沟道通过隧穿同陷阱交换电子, 就不存在激活能, 要是沟道电子跨越势垒层再被陷阱俘获, 则 1eV 以上的高势垒又同实测的激活能相背离. 因此, 深入研究陷阱的位置和陷阱能级才能弄清陷阱俘获电子的机理, 给出完整的陷阱模型.

2 陷阱激活能与异质结构的关联

笔者在文献[1]中提出 GaN 异质结表面有一个极化吸附层, 吸附层中形成二维表面态. 图 1(a) 中的黑线画出自洽求解薛定谔方程和泊松方程异质结能带, 分别形成表面和沟道量子阱. 虚线画出二维电子气分布. 表面吸附层厚度取为 1.6nm, AlGaIn 势垒层厚 30nm, Al 组分为 0.3. 吸附层的能带带阶构成深 1.2eV 的表面阱. 沟道基带能级为 -0.825eV, 表面能级为 -0.509eV, 在表面导带底以下 0.97eV 处. 表面能级比沟道基带能级高 0.316eV. 图 1(b) 中的实线、点划线和虚线分别画出基态、表面态和与表面态能量靠近的激发态波函数 Ψ_0 , Ψ_s 及 Ψ_{ex} . 基态和表面态波函数分别限制在沟道阱和表面阱中, 而激发态能量已高于右势垒, 波函数扩展到右势垒中.

沟道阱中存在高密度的二维电子气, 是一个强简并体系. 深能级全被电子填满, 不影响器件的射频工作. 表面能级在表面导带底以下约 1eV 处, 比沟道基态能级高约 0.3eV. 器件工作时, 沟道电子被强电场加速跃迁到同表面态能级持平的高激发态子带时, 就能隧穿到表面态, 同陷阱能级交换电子. 表面态和沟道基态能级之差就是陷阱的激活能. 表 1 中列出了瞬态电流和产生-复合噪声中测得的激活能. 表中前两列分布列出势垒层组分比 x 和宽度 W . 容易看出, 激活能分布在很宽的范围内, 随异质结构及器件工作状态改变而变化.

[†] 通信作者. Email: xuefsh@yahoo.com.cn
2006-12-30 收到

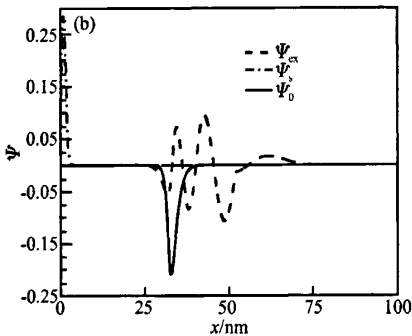
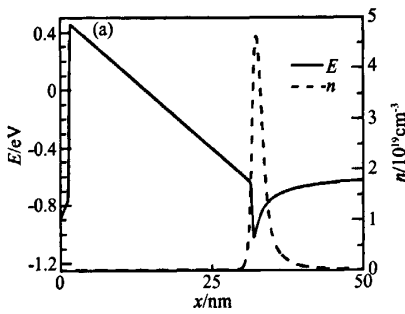


图 1 (a)AlGa_{0.35}N/GaN 异质结能带和二维电子气;(b)基态、表面态和激发态的波函数

Fig. 1 (a)Energy band and two dimensional electron gas;(b)Wave function for fundamental, excited states in channel and surface state in AlGa_{0.35}N/GaN heterojunction

表 1 瞬态电流和产生-复合噪声实验中测得的激活能
Table 1 Measured active energies from transient current and G-R noise

x	W/nm	Measuring method	Active energy/eV	Reference
0.35	29	Transient current	0.3	[2]
0.28	30	Transient current	0.37	[3]
0.2	30	G-R noise	0.8~1	[4]
0.2	40	G-R noise	0.42	[5]
0.14	16	G-R noise	0.35	[6]

Balandin 等人^[6]用同样的材料生长和器件工艺制作 F₂ 和 P₁ 两种异质结构. F₂ 在 50nm 不掺杂沟道层上生长 3nm 不掺杂隔离层和 20nm 势垒层, Al 组分为 0.33, 势垒层掺杂浓度为 4 × 10¹⁸ cm⁻³. P₂ 则在 50nm 掺杂沟道层(掺杂浓度 2 × 10¹⁸ cm⁻³)上生长 3nm 不掺杂隔离层和 20nm 势垒层, Al 组分为 0.14, 势垒层掺杂为 5 × 10¹⁸ cm⁻³. 在 P₂ 制作的器件中观察到产生-复合噪声, 测得激活能为 0.35eV. 而用 F₁ 制成的器件中则观察不到产生-复合噪声. 本文自洽解算薛定谔方程和泊松方程计算了这两种异质结构的能带和表面能级. 图 2 中的实线和虚线分别画出 P₁ 和 F₂ 两种结构的能带. 计算

中假设表面都存在 1nm 宽能带阶为 1eV 的吸附层. P₁ 的势垒层薄, 势垒高度低, 算得的表面能级比沟道基带高 0.38eV, 和实测激活能接近. F₂ 的势垒层宽, 势垒高度高, 如虚线所示. 算得的表面能级比沟道基带高 0.67eV. 沟道距表面层较远, 电子跃迁到这样高表面能级的几率很小. 因此, 实验中观察不到产生-复合噪声. 这说明激活能依赖于异质结构, 进一步证明了本文提出的陷阱模型.

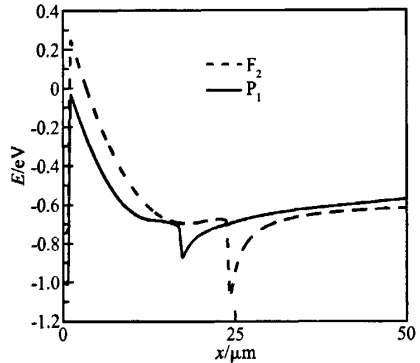


图 2 F₁ 和 P₂ 的能带
Fig. 2 Energy bands for F₁ and P₂

3 表面缺陷与热电子隧穿

Kotani 等人^[7]在计算肖特基势垒伏安特性时指出, GaN 表面层在材料生长和工艺制作过程中会产生高密度缺陷. 其能级在导带底以下 0.37eV 处. 离化缺陷中心产生高表面电荷密度, 减薄了势垒, 导致很大的隧穿电流. 他们假设表面电荷呈指数分布, 即

$$N = N_0 \exp(-x/\lambda) \quad (2)$$

N₀ 和 λ 选取 5 × 10¹⁸ cm⁻³ 和 11nm, 计算出的不同温度下的伏安特性和实验数据间吻合得很好. 使用这种表面缺陷算出的 Al_{0.35}Ga_{0.65}N/GaN/Al_{0.05}Ga_{0.95}N 双异质结能带和电子气分布如图 3 (a)中的实线和虚线所示. 表面附近高浓度表面缺陷电荷使能带弯曲, 势垒变薄. 图 3(b)中的实线和虚线分别画出表面态和同表面态能量持平的激发态波函数. 同图 1(b)对照, 表面附近势垒层减薄后表面态的波函数渗透到势垒层中. 而激发态波函数被右势垒限制, 不能进入缓冲层, 使器件容易夹断, 免受缓冲层缺陷的影响. 表面态能级高于左势垒, 波函数扩展到左势垒. 在薄高势垒下衰减后又在深阱产生一个波峰. 激发态波函数同表面态波函数间产生很强的交叠和高隧穿几率, 证实了热电子隧穿过程.

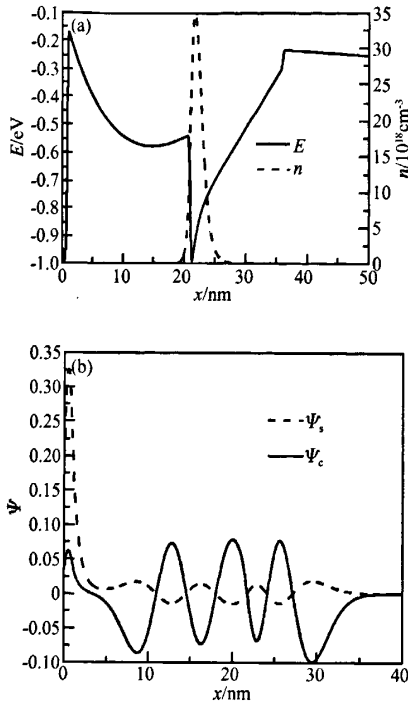


图3 存在表面缺陷的 AlGaIn/GaN/AlGaIn 双异质结的能带、二维电子气(a)和沟道激发态、表面态的波函数(b)
Fig. 3 Energy band and two dimensional electron gas (a) and wave function for excited states in channel and surface state (b) in AlGaIn/GaN/AlGaIn double heterojunction with surface defects

4 沟道和表面间的电子交换与瞬态电流

图4中画出图3的异质结能带及相关能级. 沟道基带能级为 -0.795eV , 如图中短直线所示. 表面态能级为 -0.472eV , 如虚线所示. 它比沟道基带能级高 0.323eV , 该能级差就是热电子隧穿中的激活能. 表面缺陷态位于导带底以下 0.37eV 处, 如图中点划线所示. 表面态和缺陷态电子能隧穿到沟道激发态(过程 a), 也可向上跃迁到表面导带底, 然后再移动到沟道中(过程 b). 但反过来沟道中电子跨越高势垒跃迁到表面附近导带底 d 的几率非常小. 只能在电场加速下跃迁到同表面态和表面缺陷相应的激发态子带后, 隧穿到表面态和表面缺陷(过程 c).

零栅压下在漏极加脉冲电压时, 沟道中的热电子通过过程(c)跃迁到表面态和表面缺陷, 产生快、慢两种上升过程. 漏脉冲结束后表面缺陷通过过程(b)发射电子, 产生快衰退. 而表面态则通过过程(a)隧穿到沟道, 形成非指数的慢衰退电流. 当栅压加负脉冲使沟道夹断时, 沟道电子向表面缺陷和表面态

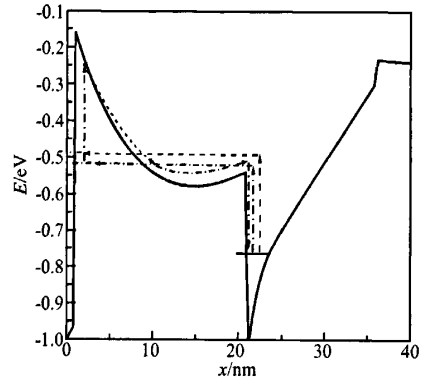


图4 沟道基态、激发态和表面态间的跃迁
Fig. 4 Transition among fundamental state in channel, surface state and surface defect state

充电, 电流变化同漏电压接通情形相当. 负栅脉冲结束时, 沟道电子通过过程(c)向表面态和表面缺陷充电, 电流上升时间较长, 呈现非指数变化.

5 讨论

AlGaIn/GaN 异质结的沟道是强简并体系, 深能级已被填满. 自洽求解薛定谔方程和泊松方程发现, 只有表面态和表面缺陷的能级能和沟道交换电子. 表面陷阱是影响器件性能的关键. 计算得到的激活能同实验值吻合, 3种跃迁过程解释了瞬态电流和产生-复合噪声实验. 材料生长和器件工艺中引入的表面缺陷会显著增强表面陷阱的作用. 优化设计量子阱结构和降低表面缺陷能弱化陷阱作用, 改善器件性能.

参考文献

- [1] Xue Fangshi. Two dimensional surface states in a GaN heterostructure. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(10); 1939 (in Chinese) [薛舫时. GaN 异质结的二维表面态. 半导体学报, 2005, 26(10); 1939]
- [2] Meneghesso G, Verzellesi G, Pierobon R, et al. Surface-related drain current dispersion effects in AlGaIn-GaN HEMTs. IEEE Trans Electron Devices, 2004, 51(10); 1554
- [3] Hasegawa H, Inagaki T, Ootomo S, et al. Mechanisms of collapse and gate leakage currents in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors. J Vac Sci Technol, 2003, 21(4); 1844
- [4] Romyantsev S L, Pala N, Shur M S, et al. Generation-recombination noise in GaN/AlGaIn heterostructure field effect transistors. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3); 530
- [5] Romyantsev S, Levinshtein M E, Gaska R, et al. Low-frequency noise in AlGaIn/GaN heterojunction field effect transistors on SiC and sapphire substrates. J Appl Phys, 2000, 87(4); 1849

- [6] Balandin A, Morozov S, Wijeratne G, et al. Effect of channel doping on the low-frequency noise in GaN/AlGaIn heterostructure field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 1999, 75 (14):2064
- [7] Kotani J, Hashizume T, Hasegawa H. Analysis and control of excess leakage currents in nitride-based Schottky diodes based on thin surface barrier model. *J Vac Sci Technol B*, 2004, 22(4):2179

Location and Active Energy for Trap in AlGaIn/GaN HFET

Xue Fangshi[†]

(National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing
Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: The fundamental state, excited state, and two-dimensional surface state in AlGaIn/GaN HFET are investigated through self-consistent solution of Schrödinger equation and Poisson equation, from which the trap location and active energy are determined. It is found that the barrier width is thinned by the surface defects, which enhances the hot electron tunneling between channel and surface tremendously. From new trap model constituted of emission from surface defect and hot electron tunneling, the transient current and G-R noise in AlGaIn/GaN HFET are explained satisfactorily. At last a new way to alleviate traps and improve HFET performance through the changing of material growth and technological process is discussed.

Key words: AlGaIn/GaN HFET; trap; two-dimensional surface state; surface defect; hot electron tunneling

EEACC: 7320C; 2550E; 2520D

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0418-04

[†] Corresponding author. Email: xuefsh@yahoo.com.cn

Received 30 December 2006