

表面电荷与体陷阱对 GaN 基 HEMT 器件热电子和量子效应的研究

郝立超¹⁾ 段俊丽^{2)†}

1) (同济大学物理学院, 上海 200092)

2) (上海交通大学医学院附属新华医院, 上海 200240)

(2009 年 8 月 6 日收到; 2009 年 8 月 19 日收到修改稿)

研究了 GaN 基 HEMT 器件表面电荷和体陷阱的变化对输出特性的影响. 通过分析表面电荷与体陷阱对电流坍塌效应、饱和电流和膝点电压的影响, 初步确定了其变化关系. 研究结果显示表面电荷的增加能够耗尽二维电子气, 减弱电流坍塌效应, 降低饱和电流, 使膝点电压非正常后移. 同时, 体陷阱的减小可以有效减弱电流坍塌效应, 增大饱和电流, 且膝点电压基本保持不变. 晶格温度较低时, 热电子效应和量子隧穿效应对电流坍塌效应影响显著. 采用流体动力学模型, 分析了引起电流坍塌效应的内在物理机制, 并获得了器件设计和制备的优化方案.

关键词: GaN-HEMT 器件, 电流坍塌效应, 热电子效应, 表面电荷

PACC: 7320D, 7340N, 7360L

1. 引言

第三代宽禁带半导体材料 GaN 不仅具有宽的禁带(3.47 eV), 而且还具有热导率大、电子饱和速率高、击穿场强大及热稳定性好等特性, 因此在制备高温、高频、高压及大功率器件方面备受关注, 在军用和民用市场有着广阔的应用前景^[1-3]. 但是电流坍塌效应、热电子效应、极化效应和自加热效应等不利因素的存在, 限制了 GaN 器件的广泛应用^[4-7]. 为了进一步提高 GaN 基 HEMT 器件的性能, 建立可与不同工艺水平相适应的器件模拟平台是十分必要的. GaN 基 HEMT 器件的制备工艺复杂, 周期长且价格昂贵. 为降低开发费用, 提高产品性能, 器件模拟成为实验之外一种非常重要的工具^[8-10], 为器件的优化提供了一种切实可行、省时省力的方法. 通过器件模拟技术可以了解制约器件性能的物理机制, 为进一步提高器件性能提供理论支持^[11-14]. 但是到目前为止 GaN 基 HEMT 器件的物理模型还没有完整的建立起来, 特别是文献报道中很多物理参数不一致, 比如 InN 禁带宽度^[15]. 甚至有些文献的参数自相矛盾, 比如由器件瞬态电流

测量可以得到一个 0.3—0.4 eV 间的激活能, Hasegawa 等^[16]将表面能级定在导带底以下 0.37 eV, 但 Meneghesso 等^[17]则认为表面能级是价带顶上 0.3 eV 的空穴陷阱. 有些物理参数到目前为止尚未确定.

现在有很多对 GaN 基 HEMT 器件进行模拟计算的模型^[3, 4, 7, 15]. 但是大多数模型忽略了对器件影响重大的两个因素, 即沟道处二维电子气(2DEG)的量子隧穿效应^[18]和热电子效应. 这两个效应都可以使沟道中的电子克服势垒层和缓冲层的势垒, 进入势垒层和缓冲层并被体陷阱俘获, 从而对电流坍塌效应产生重要影响. 同时, 这些模型多数是基于自加热效应对电流坍塌效应的影响来进行研究^[2, 4], 对饱和电流及膝点电压变化的研究较少. 即使有研究提到饱和电流和膝点电压变化, 也只是简单介绍^[19], 对电流坍塌效应影响的内在物理机制鲜有研究. 这些都使对 GaN 基 HEMT 器件的认识不够完整, 不能全面地把握各种现象内在的联系.

由于极化作用、射线辐射^[20]等原因形成的表面电荷及晶格失配等原因形成的体陷阱对 GaN 基 HEMT 器件的电学特性有着重要影响, 本文通过改

† 通讯联系人. E-mail: junlishanghai2005@yahoo.com.cn

变表面电荷和体陷阱浓度来观察其对输出特性曲线的影响, 确定电流坍塌效应、饱和电流和膝点电压的变化. 重点从量子隧穿和热电子效应两方面解释输出特性曲线的变化, 分析表面电荷与体陷阱对器件性能影响的内在物理机制, 并就器件设计和制备提出优化方案.

2. 理论模型

本文采用的 GaN 基 HEMT 器件结构如图 1 所示. 其中源漏极长度都为 $1 \mu\text{m}$, 坐标原点 O 在 InGaN/GaN 界面中心. 在 AlGaIn/GaN 异质结间增加 InGaIn 层有助于改善其表面和界面处的粗糙度^[15], 并可以将 2DEG 主要约束在 InGaIn 层中. 在模型中我们假定一个 $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的固定温度, 这样就可以忽略自加热效应的影响. 由于自发极化和压电极化可以产生界面电荷, 而局部应变松弛可能导致极化电荷减少, 且形成的大量界面电子陷阱^[21]会部分中和极化电荷, 因此采用有效界面电荷密度为 $1.15 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ^[22]. 根据实验观察估计 Schottky 势垒高度为 1.55 V . 相对金属/GaN 电极, Al 摩尔分数每增加 1%, 金属/AlGaIn 电极的势垒增加约 0.02 V ^[23]. 因为界面和表面陷阱的主要效果通过定义有效界面极化电荷来考虑, 所以在我们的模拟中只包括受主类电子陷阱. 唯一与文献不同的是 GaN 的电子饱和速度. 为了使饱和电流的值与实验观测值吻合, 需要把它降低约 40%. 其他重要参数值在表 1 中给出.

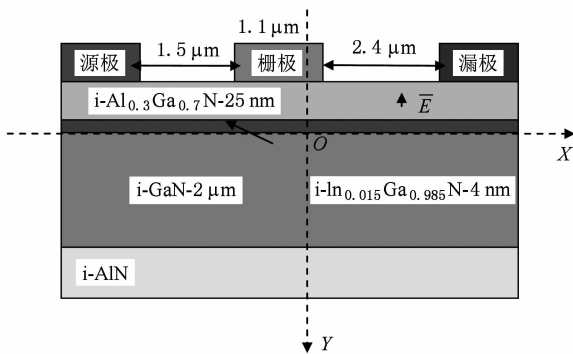


图 1 GaN 基 HEMT 器件结构 其中 X, Y 为模拟时采用的坐标系, E 为 AlGaIn 层的电场方向

在半导体输出特性的分析中, 其模拟结果主要是基于 Caneli 迁移率的流体动力学模型. Caneli 迁移率的表达式为^[24]

$$\mu = \frac{\mu_{\text{low}}}{[\sqrt{1 + \alpha^2 (\omega_c - \omega_0)^\beta} + \alpha (\omega_c - \omega_0)^{\beta/2}]^{2/\beta}}, \quad (1)$$

其中 μ_{low} 是低电场强度下的迁移率, β 是值为 0.75 的常数, $\omega_c = 3k_B T_c/2$ 是载流子平均热能, $\omega_0 = 3k_B T_L/2$ 是平衡热能, T_c 和 T_L 分别是平均载流子温度和平均晶格温度, $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_{\text{low}}}{q\tau_{e,c} V_{\text{sat}}^2} \right)^{2/\beta}$, V_{sat} 是饱和速度, $\tau_{e,c}$ 是载流子弛豫时间. 通过自洽求解 Poisson 方程和 Schrödinger 方程, 可以很好地模拟热电子效应和量子效应, 确定表面电荷与体陷阱对输出特性影响的内在物理机制.

3. 计算结果及分析

3.1. 表面电荷的影响

由于 AlGaIn/InGaIn/GaN 禁带宽度的不同, 在其界面处会形成很强的极化电荷, 从而在 AlGaIn 表面诱导产生 10^{12} 量级的表面电荷. 这些表面电荷的存在对热电子效应和量子隧穿效应有着非常重要的影响.

表 1 GaN 基 HEMT 器件材料的基本参数

物理量/单位	GaN	InN	AlN
相对介电常数	9.5	15.3	8.5
禁带宽度/eV	3.47	0.8	6.2
电子亲和势/eV	3.4	5.8	1.9
电子迁移率/ $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$	1100	2400	300
电子饱和速度/ $10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	1.2	2.6	1.5
有效导带态密度/ 10^8 cm^{-3}	2.65	1.3	4.1
能量弛豫时间/ps	0.1	0.1	0.1
陷阱能级/eV	1.0	1.0	1.0

所谓热电子效应, 就是电子在高电场区域加速可以获得很高的能量, 成为过热电子. 这些过热电子可以克服势垒层和缓冲层的势垒, 被体陷阱俘获, 产生电流坍塌效应. 图 2 给出了栅极电压 V_g 分别在 0 和 -3 V 时不同表面电荷浓度下的输出曲线. 明显可以看出当表面电荷增多时, 漏电流 I_d 的坍塌效应减弱, 最终的饱和电流减小, 开始出现漏极电流降低的膝点电压后移.

首先, 我们考虑增加表面电荷对 2DEG 浓度的影响. 如图 3(a) 所示, 在 V_g 为 0 V , 漏极电压为 4 V ,

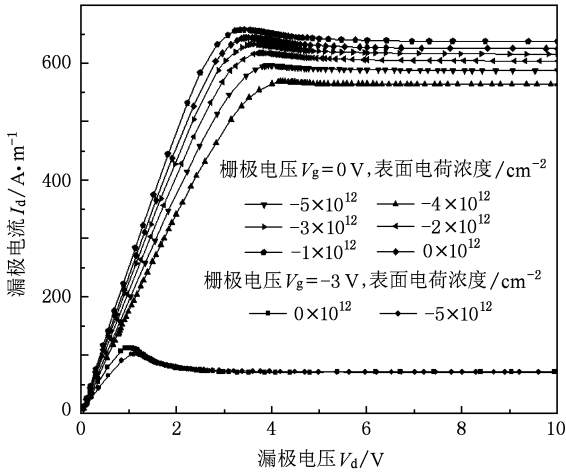


图2 不同表面电荷下的输出特性曲线

$X = -0.15 \mu\text{m}$ 进行切片,并分析电子浓度.可以看出在 InGaN 层中,最高电子浓度降低了约 1/3.图 3(b)为在 V_g 为 0 V,漏极电压为 4 V, $Y = -0.02 \mu\text{m}$ 进行切片得到的电子浓度分布图,同样可以看出电子浓度大幅降低.但在栅极漏边处随表面电荷增加电子浓度反而增加.这既表明“虚栅”的存在^[25, 26],又表明增大表面电荷起到了提高“虚栅”负电压的作用.进一步分析表明,低浓度的表面电荷使 InGaN 层处导带出现的弯曲更为剧烈,导带的剧烈弯曲会诱导产生更高浓度的 2DEG.因此可以得出结论,表面电荷的增加可以耗尽 InGaN 层中的 2DEG.由两种不同材料形成异质结时,在两种材料的界面处会形成很强的极化电荷.当表面负电荷增加时,为保持整个器件的电中性,在 AlGaIn 下界面处会产生正的诱导电荷,中和部分 2DEG 使其浓度降低.

其次,我们确定表面电荷对电流坍塌效应的影响.由上述分析可知,表面负电荷的增加会使表面势进一步降低,两界面电势差 $\nabla\varphi$ 增大,由式

$$E = \frac{\nabla\varphi}{d}, \quad (2)$$

可知 AlGaIn 层纵向电场一定会增大,其中 d 为 AlGaIn 层厚度.如图 4(b)所示,表面电荷增加到 $-5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 后,AlGaIn 层纵向电场明显增强,而 InGaN 层中纵向正电场减小了约 1/3,缓冲层的纵向正电场减小了约 1/2.图 4(a)为在 V_g 为 0 V,漏极电压为 4 V, $Y = -0.002 \mu\text{m}$ 处进行切片得到的 X 方向电场图.可以看出,表面电荷增大至 $-5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 时在栅极漏边处最大电场减小了近 7/8.通过对图 4(a)和(b)的分析,我们可以清楚地看出增大

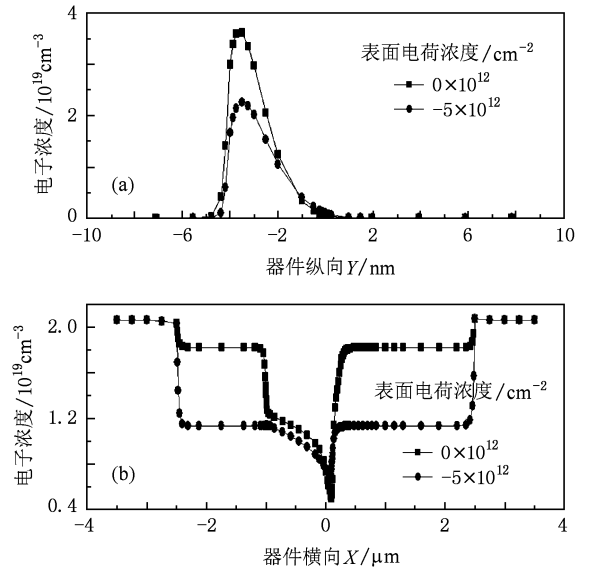


图3 不同表面电荷浓度下的电子浓度分布 (a) V_g 为 0 V,漏极电压为 4 V, $X = -0.15 \mu\text{m}$ 时 Y 方向电子浓度分布曲线; (b) V_g 为 0 V,漏极电压为 4 V, $Y = -0.02 \mu\text{m}$ 时 X 方向电子浓度分布曲线

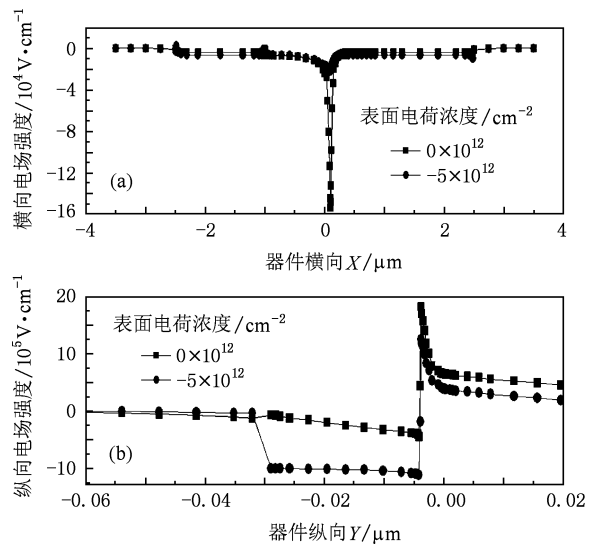


图4 不同表面电荷浓度下的电场强度 (a) V_g 为 0 V,漏极电压为 4 V, $Y = -0.002 \mu\text{m}$ 时 X 方向的电场强度变化; (b) V_g 为 0 V,漏极电压为 4 V, $X = -0.15 \mu\text{m}$ 时 Y 方向的电场强度变化

表面电荷,InGaIn 层中的电场明显降低.虽然在钝化层下的区域电场略有升高,但是由于此处 2DEG 浓度较高,电子平均自由程较短,部分区域电场强度小幅升高对提高热电子数量、增大量子隧穿系数不会有太大影响,因此我们可以忽略其作用.

InGaIn 层电场减小使电子较难获得较高温

同时由于两界面电势差 $\nabla\varphi$ 增大, 电子亲和力 $q\chi$ 升高. 由下式

$$n_{\text{th}} = \int_{q\chi}^{\infty} n(E) dE = N_c \exp\left[-\frac{q(\chi + V_n)}{k_B T}\right], \quad (3)$$

可以看出适合热电子发射的电子数会明显减少, 从而导致热电子效应减弱 (N_c 为导带中的等效态密度, V_n 为导带底部与 Fermi 能级间的差值, q 为电子电荷, k_B 为 Boltzmann 常数, T 为绝对温度). 量子隧穿系数为^[27]

$$\left(\frac{C}{A}\right)^2 = \left\{1 + \frac{[qV_0 \sinh(\beta d)]^2}{4E(qV_0 - E)}\right\}^{-1}, \quad (4)$$

其中, $\beta = \sqrt{2m_n(qV_0 - E)/\hbar^2}$, d 为隧穿深度. 势垒 qV_0 的升高和电子动能 E 的减小, 都会导致量子效应减弱, 使隧穿到表面和势垒层 (AlGaIn) 陷阱中的电子减少.

AlGaIn 和 GaN 层中电场的急剧增大, 使电子难以进入势垒层和缓冲层与体陷阱复合, 加上热电子数的大量减少, 能跨过势垒层和缓冲层势垒被体陷阱俘获的热电子更少. 因此热电子效应和量子隧穿效应减弱, 电流坍塌效应也随之减小. 这说明表面电荷对电流坍塌效应有着非常重要的作用. 但是如图 2 所示, 电流坍塌现象并没有消失, 说明还存在其他多种因素影响电流坍塌效应.

第三, 我们考虑表面电荷对饱和电流的影响. 漏极电流随电场变化关系如下

$$I = ne\mu_e(T_0 + \Delta T, \mathbf{E})W|\mathbf{E}|, \quad (5)$$

$$\Delta T = \theta P_{\text{dis}}, \quad (6)$$

$$P_{\text{dis}} = I|\mathbf{E}|L, \quad (7)$$

其中 e 是电子电荷, μ_e 是电子迁移率, n 是沟道面电子浓度, W 是器件宽度, \mathbf{E} 是沟道平均电场, θ 是器件的热阻, P_{dis} 是电子耗散焦耳功率^[5, 28].

在我们的模型中, 因为漏电压较小, 不考虑器件自加热现象, 因此上式可简化为

$$I = ne\mu_e(E)W|\mathbf{E}|. \quad (8)$$

图 5 是与图 4(a) 相对应的电子迁移率分布, 可以看出 μ_e 基本与横向电场分布一致. 虽然由于 $-5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 表面电荷的存在, 栅极漏边处 μ_e 比较高, 但是和其他部分相比, 这部分电子浓度低很多 (如图 3(b) 所示), 因此起主要作用的还是钝化层下 InGaIn 中的 2DEG. 图 5 可以看出由于表面电荷的存在, 这部分 μ_e 略有降低.

由前面的分析我们知道, 随着表面电荷的增大, 2DEG 浓度降低, 沟道电场减小, μ_e 略有下降. 因

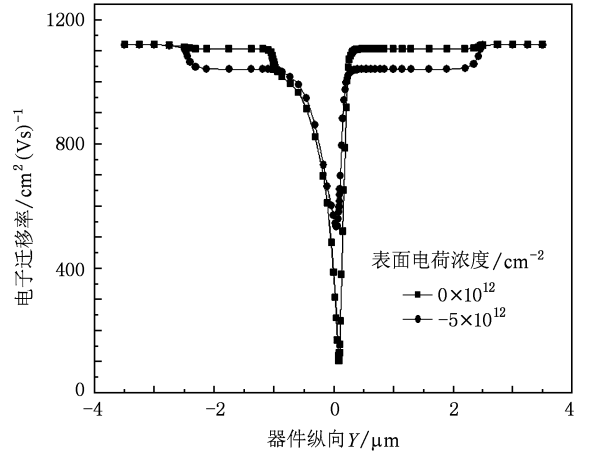


图 5 不同表面电荷下在栅极电压为 0 V, 漏极电压为 4 V, $Y = -0.02 \mu\text{m}$ 时 X 方向的 μ_e 变化

此在图 2 中可以看到表面电荷增大时最终的饱和电流降低. 而负 V_g 越高, 2DEG 浓度越低, 饱和电流随表面电荷增加而降低的就越小.

文献报道显示膝点电压随 2DEG 浓度降低而减小. 如上述分析, 表面电荷增加, 2DEG 浓度降低, 但膝点电压仍然随 2DEG 浓度的降低而增大. 这是因为由于表面电荷的存在, InGaIn 中电场强度有所降低, 为达到热电子大量发射和量子隧穿大量发生的临界条件, 漏极电压必须增大来补偿由表面电荷存在造成的电场强度降低.

综上所述, 我们可以清楚地得到表面电荷对器件输出特性的影响. 当表面电荷增加时, 热电子数减少, 势垒层和缓冲层体陷阱俘获电子数减少, 2DEG 浓度降低, 热电子和量子隧穿效应减弱. 从而造成电流坍塌效应减弱, 饱和电流减小, 膝点电压非正常增大.

3.2. 体陷阱的影响

首先考虑势垒层体陷阱的影响. GaN 基 HEMT 器件的体陷阱可分为类施主及类受主两种, 在此我们只考虑受主类电子陷阱. 图 6(a) 为 $V_g = -3 \text{ V}$ 时不同势垒层陷阱浓度下的输出特性曲线. 可以看出减小势垒层体陷阱, 电流坍塌效应明显减弱. 显然, 这是由于体陷阱浓度降低、俘获电子数减少而造成电流坍塌效应减弱. 同时, 由于同等浓度的表面电荷、不同势垒层体陷阱浓度下沟道中的电场强度变化不大, 可发射热电子数基本保持不变. 较少的体陷阱容易被迅速占据, 其负微分电导较大, 电流减小较迅速.

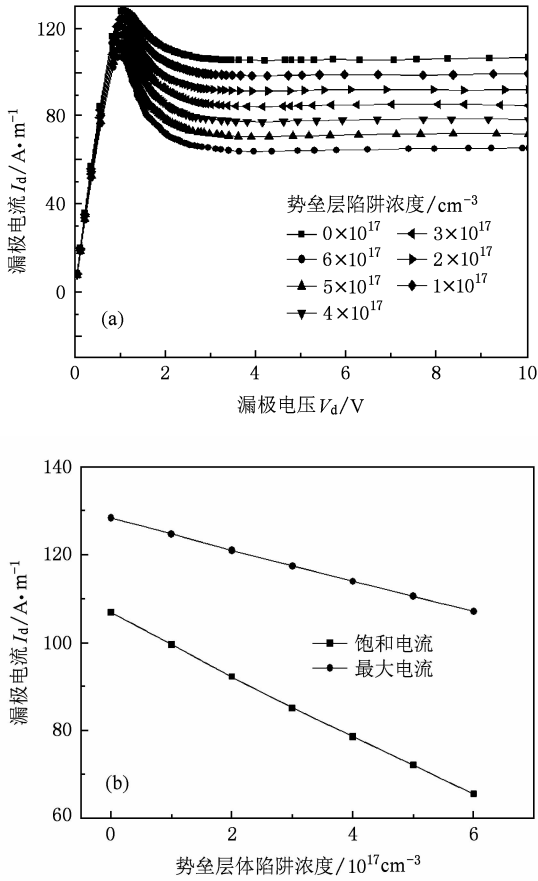


图 6 V_g 为 -3 V 时 (a) 不同势垒层陷阱的输出特性曲线, (b) 最大电流与饱和电流随势垒层陷阱浓度的变化曲线

随势垒层体陷阱浓度降低,饱和电流增大.很明显这是因为势垒层体陷阱浓度比较低时,发射的热电子和隧穿电子比较少,2DEG 浓度较高,所以饱和电流变大.但是,如图 7 所示,栅极下电子浓度基本不变,此处正是高电场区域,过热电子集中在这里.因此其他沟道区域 2DEG 浓度的降低对过热电子数影响较小,发生热电子大量发射和电子量子隧穿大幅提高的临界电场基本不变,膝点电压保持不变.

图 6(b)是在 $V_g = -3$ V 时最大电流及饱和电流随势垒层陷阱的变化曲线.可以看出,最大电流及饱和电流随势垒层体陷阱成线性关系.这是由于势垒层体陷阱大多数被电子填充,增加势垒层体陷阱浓度,就会俘获更多电子,消耗更多 2DEG,从而使最大电流及饱和电流线性减小.这种线性关系在陷阱为单一能级且陷阱深度较浅时很容易理解,但当多个陷阱能级存在时,是否存在线性关系需要进一步论证.因为热电子一般受沟道电场影响较大,漏极电压较小时沟道电场较小.因此最大电流的减

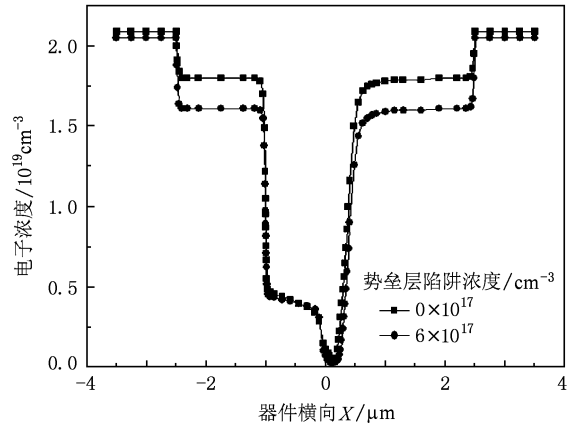


图 7 V_g 为 -3 V,漏极电压为 10 V, $Y = -0.02$ μm 时 X 方向电子浓度分布

小可能主要由量子隧穿效应决定,这需要深入的研究来确定.

然后,确定缓冲层体陷阱的影响.图 8 是 $V_g = -3$ V 时不同缓冲层陷阱浓度下的特性输出曲线.当缓冲层陷阱减少时,其电流坍塌效应明显减弱,饱和电流增大,膝点电压后移.电流坍塌和饱和电流的变化成因与势垒层影响相似,都是由于减少体陷阱浓度,电子俘获会减少,2DEG 浓度增大.同时,高密度 2DEG 中的电子平均自由时间 τ_e 比较短,由式

$$\mu_e \equiv \frac{q\tau_e}{m_e} \quad (9)$$

可知 μ_e 较低(其中 q 为电子电荷, m_e 为电子有效质量),所以高密度 2DEG 比低密度 2DEG 较难获得高温.为达到热电子大量发射和量子隧穿大幅提高的临界,漏压会随之增大,膝点电压后移.

对比图 2,6 和 8 可以看出,势垒层体陷阱是产

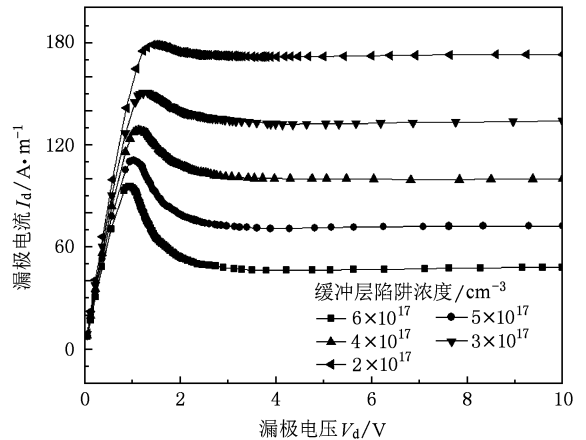


图 8 V_g 为 -3 V 时不同缓冲层陷阱下的输出特性曲线

生电流坍塌效应的最主要成因. 它的小幅降低能使电流坍塌效应明显减弱. 这是因为缓冲层厚度较大, 其俘获电子的区域大大超出势垒层陷阱的面积, 因此缓冲层体陷阱是电流坍塌效应的主要因素.

综上所述, 缓冲层陷阱与势垒层陷阱的影响原理基本一致, 但由于缓冲层厚度较大, 它对电流坍塌效应的影响更明显. 这就要求我们在器件的设计和制备中, 要把降低缓冲层陷阱浓度放在首要地位.

4. 结 论

本文研究了表面电荷和体陷阱对 GaN 基

HEMT 器件输出特性的影响. 计算获得了不同表面电荷下沟道中的电子浓度和电场分布. 发现 2DEG 浓度随表面电荷增加而逐渐耗尽, 而电场变化主要是由极化的电中性要求决定, 进而影响热电子效应和量子隧穿效应. 理论研究发现, 体陷阱通过俘获热电子对器件输出特性影响巨大, 特别是缓冲层中的体陷阱小幅减少可使电流坍塌效应明显减弱, 同时, 饱和电流与势垒层陷阱浓度线性相关. 进一步研究表明, 沟道中不同区域 2DEG 对器件输出特性有不同的影响, 该发现可能成为新结构 GaN 基 HEMT 器件研究的重要参考依据.

- [1] Gu W P, Hao Y, Zhang J C, Wang C, Feng Q, Ma X H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 511 (in Chinese) [谷文萍、郝跃、张进城、王冲、冯倩、马晓华 2009 物理学报 **58** 511]
- [2] Hu W D, Chen X S, Quan Z J, Zhang M X, Huang Y, Xia C S, Lu W, Ye D P 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 034502
- [3] Zhou Z T, Guo L W, Xing Z G, Ding G J, Tan C L, Lü L, Liu J, Liu X Y, Jia H Q, Chen H, Zhou J M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6013 (in Chinese) [周忠堂、郭丽伟、邢志刚、丁国建、谭长林、吕力、刘建、刘新宇、贾海强、陈弘、周均铭 2007 物理学报 **56** 6013]
- [4] Hu W D, Chen X S, Quan Z J, Xia S C, Lu W, Yuan H J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 243501
- [5] Hu W D, Chen X S, Quan Z J, Xia S C, Lu W, Ye P D 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 074501
- [6] Xi G Y, Ren F, Hao Z B, Wang L, Li H T, Jiang Y, Zhao W H, Yan J, Luo Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7238 (in Chinese) [席光义、任凡、郝智彪、汪莱、李洪涛、江洋、赵维韩、彦军、罗毅 2008 物理学报 **57** 7238]
- [7] Simin G, Yang J Z, Koudymov A, Adivarahan V, Yang J, Khan M A 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 033510
- [8] Hu W D, Chen X S, Zhou X C, Quan Z J, Lu W 2006 *Microelectron. J.* **37** 613
- [9] Xia C S, Hu W D, Wang C, Li Z F, Chen X S, Lu W, Simon Li Z M, Li Z Q 2006 *Opt. Quant. Electron.* **38** 1077
- [10] Wang C, Quan S, Zhang J F, Hao Y, Feng Q, Chen J F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1966 (in Chinese) [王冲、全思、张金凤、郝跃、冯倩、陈军峰 2009 物理学报 **58** 1966]
- [11] Qiao H, Liao Y, Hu W D, Deng Y, Yuan Y G, Zhang Q Y, Li X Y, Gong H M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7088 (in Chinese) [乔辉、廖毅、胡伟达、邓屹、袁永刚、张勤耀、李向阳、龚海梅 2008 物理学报 **57** 7088]
- [12] Yin F, Hu W D, Quan Z J, Zhang B, Hu X N, Li Z F, Chen X S, Lu W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7884 (in Chinese) [殷菲、胡伟达、全知觉、张波、胡晓宁、李志锋、陈效双、陆卫 2009 物理学报 **58** 7884]
- [13] Hu W D, Yin F, Ye Z H, Quan Z J, Hu X N, Li Z F, Chen X S, Lu W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7891 (in Chinese) [胡伟达、殷菲、叶振华、全知觉、胡晓宁、李志锋、陈效双、陆卫 2009 物理学报 **58** 7891]
- [14] Hu W D, Chen X S, Yin F, Quan Z J, Ye Z H, Hu X N, Li Z F, Lu W 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 104502
- [15] Braga N, Mickevicius R, Gaska R, Hu X, Shur M S, Asif K M, Simin G, Yang J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 6409
- [16] Hasegawa H, Inagaki T, Ootomo S 2003 *J. Vac. Sci. Technol.* **21** 1844
- [17] Meneghesso G, Verzellesi G, Pierobon R, Rampazzo F, Chini A, Mishra U K, Canali C, Zanoni E 2004 *IEEE Trans. Electron Devices* **51** 1554
- [18] Feng Q, Hao Y, Yue Y Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1886 (in Chinese) [冯倩、郝跃、岳远征 2008 物理学报 **57** 1886]
- [19] Hu W D, Chen X S, Yin F, Zhang J B, Lu W 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 084502
- [20] Gu W P, Zhang J C, Wang C, Feng Q, Ma X H, Hao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1161 (in Chinese) [谷文萍、张进城、王冲、冯倩、马晓华、郝跃 2009 物理学报 **58** 1161]
- [21] Liu L J, Yue Y Z, Zhang J C, Ma X H, Dong Z D, Hao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 536 (in Chinese) [刘林杰、岳远征、张进城、马晓华、董作典、郝跃 2009 物理学报 **58** 536]
- [22] Gaska R, Bykhovski A D, Shur M S 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3577
- [23] Li Z F, Lu W, Shen S C, Holland S, Hu C M, Heitmann D, Shen B, Zhang Y D 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 431
- [24] Faraclas E W, Anwar A F M 2006 *Solid-State Electron.* **50** 1051
- [25] Wells A M, Uren M J, Balmer R S, Hilton K P, Martin T, Missous M 2005 *Solid-State Electron.* **49** 279
- [26] Wei W, Lin R B, Feng Q, Hao Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 0467 (in Chinese) [魏巍、林若兵、冯倩、郝跃 2008 物理学报 **57** 0467]

- [27] Hu W D, Chen X S, Quan Z J, Zhou X C, Lu W 2006 *J. Infrared Millim. Waves* **25** 90 (in Chinese) [胡伟达、陈效双、全知觉、周旭昌、陆 卫 2006 红外与毫米波学报 **58** 90]
- [28] Gaska R, Osinsky A, Yang J W, Shur M S 1998 *IEEE Electr. Device Lett.* **19** 89

Static surface states and bulk traps in AlGaIn/GaN HEMT including hot electron and quantum effects

Hao Li-Chao¹⁾ Duan Jun-Li²⁾ †

1) (Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

2) (Xinhua Hospital, School of Medicine, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

(Received 6 August 2009; revised manuscript received 19 August 2009)

Abstract

The effects of static surface states and bulk traps on output characteristics have been studied. The effects of surface charge and bulk traps on current collapse, saturation current and knee voltage are investigated, and their relationships have been determined. The results show that the increase of the surface charge can exhaust the two-dimensional electron gas, and reduce the current collapse effect and saturation current, inducing the abnormal shift of the knee voltage. At the same time, reducing the bulk traps can alleviate the current collapse effect and increase the saturation current with the slight change of the knee voltage. At low lattice temperature, the hot electron effect and quantum tunneling effect play an important role in the current collapse. By using the hydrodynamics model, possible physical mechanisms are discussed, and an approach is proposed to reduce the effects of the static surface states and bulk traps on the output characteristics.

Keywords: GaN-based HEMT, current collapse effect, hot electron effect, surface charge

PACC: 7320D, 7340N, 7360L

† Corresponding author. E-mail: junlishanghai2005@yahoo.com.cn