

GaN HFET 沟道热电子隧穿电流崩塌模型

薛舫时

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 研究了 GaN HFET 中沟道热电子隧穿到表面态及表面态电子跃迁到表面导带两种跃迁过程及其激活能. 从沟道热电子隧穿过程出发, 提出了新的电流崩塌微观模型. 用该微观模型解释了光离化谱、DL TS、瞬态电流及电流崩塌等各类实验现象. 研究了各种异质结构的不同电流崩塌特性, 在此基础上讨论了无电流崩塌器件的优化设计.

关键词: 电流崩塌; 瞬态电流; 热电子隧穿; GaN HFET

EEACC: 2560S; 2520D; 2550E

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)11-2143-06

1 引言

大功率 GaN HFET 中的电流崩塌严重影响了器件的生产和应用, 成为器件开发中的一个瓶颈. 它分为漏延迟和栅延迟两类, 前者同 GaN 缓冲层和势垒层中的陷阱有关^[1], 随着外延工艺的改进, 材料缺陷密度逐渐降低, 其影响已越来越小; 后者由势垒层的表面能级引起^[2], 直接与异质结表面的极化电荷和能带结构相关联, 是目前的研究焦点.

Daumiller 等人^[3]指出在栅-漏电极间隙势垒层表面积累电子形成一个虚栅. 虚栅电场降低了下面沟道中二维电子气的浓度, 减少了漏电流. 无栅器件在不太高的电压下电流就趋于饱和^[4], 证实了虚栅的存在. 目前虚栅已被广泛地用来描述栅外势垒上的表面状态和解释器件的电流崩塌行为, 关键要研究虚栅上电子的充、放电过程.

光离化谱和 DL TS 测量^[5-7]发现了导带底以下 1~2eV 的表面能级. 常规理论^[8,9]认为高能热电子必须跨越势垒达到表面, 再同表面态交换电子. 但是, 电子跨越这样高势垒的几率很小, 而且表面态同导带间的大能量差, 不能说明弛豫时间在微秒至毫秒量级的电流崩塌. 由器件瞬态电流测量发现, 漏电流的激活能在 0.3~0.4eV 之间, 因此 Hasegawa 等人^[4]将表面能级定在导带底以下 0.37eV, Menegh-

esso 等人^[10]则认为表面能级是价带顶上 0.3eV 的空穴陷阱, 与前面所述表面能级矛盾. 如果表面能级真的离带边这样近, 只要用红外光照射就能使电流恢复, 而这同实验结果相违背.

许多研究者认为栅电极上的电子注入势垒层后通过有耗介质传输到虚栅^[3]. 虚栅的充放电过程仅决定于栅-漏间的电势差, 同异质结构和沟道状态无关. 然而, 实验发现^[11], 只有加负栅电压使沟道夹断后才有显著的电流崩塌, 而且不同异质结构制成的器件有各不相同的电流崩塌行为, 这些都难以用有效介质传输模型来解释. Koley 等人^[12]测得表面势垒宽度达微米量级, 电子很难隧穿通过这样宽的势垒. 实验中也并没有发现电流崩塌同栅电流的关联. Tarakji 等人^[13]指出, MOSHFET 的栅电流比 HFET 小 4~6 个数量级, 而两者的电流崩塌特性相近, 说明栅流不是产生电流崩塌的主要原因.

本文提出了 GaN 异质结表面极化电荷诱生的二维表面态模型, 计算的能级^[14]同光离化谱和 DL TS 实验测量值相符, 比沟道子带约高 0.3~0.4eV. 二维表面态具有和沟道电子气相当的态密度和子带结构. 当沟道电子被强电场加速跃迁到同表面态持平的激发态子带时, 热电子就能隧穿到表面态, 使虚栅充电, 产生电流崩塌. 沟道子带同表面能级的差正好等于瞬态电流的热激活能, 解决了上述表面能级与瞬态电流激活能间的矛盾.

薛舫时 男, 1939 年出生, 研究员, 从事 GaN HFET 研究.

2005-01-02 收到, 2005-06-10 定稿

下一节中,首先从沟道电子气状态和二维表面态特性出发讨论热电子隧穿过程,并在此基础上提出新的电流崩塌微观模型,解释各类实验现象.第三节用此微观模型来研究电流崩塌同异质结构间的关联.最后讨论以优化器件结构设计来消除电流崩塌的几种方案.

2 沟道与表面态间的热电子隧穿和电流崩塌

氮化物表面的强极化电荷能吸附周围分子产生 2nm 左右的吸附层.它与势垒层间存在一定的能带带阶,形成深而窄的量子阱和限制于阱内的二维表面态.图 1 中的实线示出了用二维表面态理论算出的表面阱和异质结能带结构.虚线示出限制于量子阱内的电子气分布.点线和点划线分别标出二维表面能级和沟道电子气的基态能级.沟道电子气基态能级为 -0.822eV .表面态能级在 -0.486eV ,比表

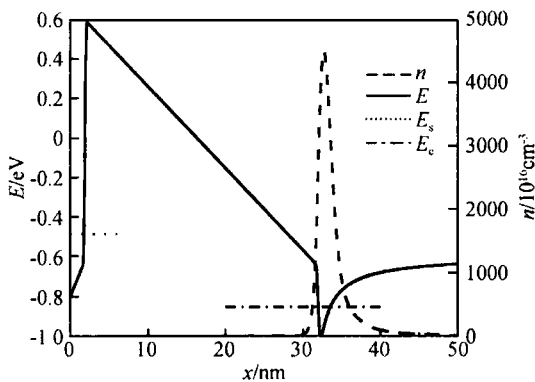


图 1 AlGaIn/GaN 异质结的表面阱、沟道阱和二维电子气
Fig. 1 Surface well, quantum well in channel and two dimensional gases at AlGaIn/GaN heterojunction

面导带底低 1.08eV ,同漏电流 DL TS 测量^[15]一致.沟道电子同表面态间的能级差为 0.336eV ,同实验测得的瞬态电流激活能相吻合.图 2 中的实线示出表面态的波函数,它被压缩在窄而深的表面量子阱中.虚线所示为沟道中同表面能级持平的第 50 个激发态子带的波函数.由图 2 容易看出,高激发子带能量高于沟道势垒,波函数扩展到势垒层中,同表面电子波函数的差距不到 20nm,产生隧穿的几率较高.如果用光照射势垒表面,当表面态上的电子吸收光子后能跃迁到表面导带底时,电流才得以恢复.因此,光离子谱测得的是表面能级与导带底间的能量差^[5,11].DL TS^[7]测得的也是表面能级与导带间的跃

迁过程.两种不同的电子跃迁过程导出了不同的激活能.

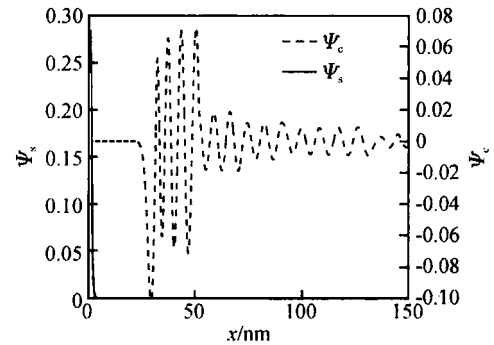


图 2 AlGaIn/GaN 异质结中的表面态和沟道电子的波函数
Fig. 2 Wave functions of surface state and two dimensional electron state in channel in AlGaIn/GaN heterojunction

图 3 示出了 GaN HFET 的动态漏电流.图中的实线表示漏压固定为 10V、栅压在 $-4 \sim 1\text{V}$ 范围内变化时的漏电流.漏电流随栅压升高而增大,上升和下降曲线靠近,没有产生电流崩塌.如果把栅压降低到 -5V ,如图中 P 点所示.再升高栅压时,漏电流如虚线所示,大大低于实线所示的电流.在 Q 点电流约降低了一半,而且上升和下降曲线间有很大的滞后.这种沟道被夹断后不易打开的行为正是电流崩塌的主要特征.

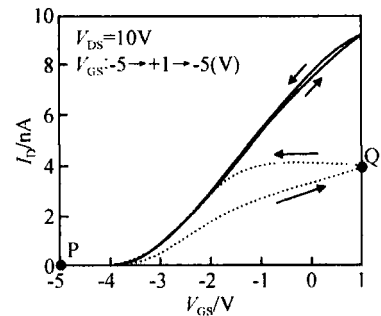


图 3 GaN HFET 在不同栅压下的动态漏电流
Fig. 3 Dynamic drain current under different gate voltages in GaN HFET

为讨论方便,本文把栅电极下的沟道称为内沟道,栅外势垒层下的沟道称为外沟道.在强负栅压下,内沟道被夹断.没有电子流入外沟道,耗尽区向外沟道扩展.边界区的电子在强电场作用下跃迁到高激发子带,隧穿到表面态,使虚栅充电,表面势垒升高,降低了外沟道的电子气浓度,使之部分夹断.当栅压从 P 点回升时,内沟道被打开,电子流向

外沟道.但虚栅上的电子及表面势还未改变,阻碍了外沟道状态的恢复.由于电中性要求,流入外沟道的电子又限制了表面态电子隧穿回沟道.因此,外沟道的打开要比内沟道慢得多. Koley 等人^[16]用 Kelvin 探针测量了 GaN HFET 中的瞬态漏电流和表面势,虚栅表面势的变化同上述外沟道逐渐打开的过程一致.在大信号射频工作中,没有打开的外沟道增大了栅-漏电阻,显著降低了射频电流,如图 3 虚线所示. Simin 等人^[17]用加栅传输线方法测量了外沟道电阻,证明电流崩塌是由外沟道电阻增大造成的.

Hasegawa 等人^[4]在瞬态电流测量中发现电流变化中包含有非指数部分.而且俘获时间比发射时间长.热电子隧穿模型中包含热电子加速、子带跃迁和隧穿等复杂过程,导致非指数变化.电子只有被电场加速跃迁到高激发子带后才能隧穿到表面态,俘获时间就应比从表面态隧穿回沟道的时间长.此外他们还发现,时间常数依赖于电压和温度,要用依赖于电压的势垒来描述,这也同热电子的子带跃迁和隧穿过程相吻合.

在强负栅压和高漏压下,隧穿到表面态的热电子数增大,产生显著的电流崩塌^[13,14].在栅外表面生长适当的钝化层,消除表面吸附层,就能显著降低表面态密度^[6],抑制电流崩塌.制作适当的场板电极来降低外沟道电场,抑制热电子隧穿,也就减弱了电流崩塌^[18,19]. Daumiller 等人^[3]测得不同器件的电流崩塌频率响应覆盖了从 10^{-3} Hz 到 10 GHz 的宽频带,难以用通常的陷阱俘获过程来描述.现在隧穿几率与势垒宽度间存在指数关系,不同器件的电场结构、沟道电子气和表面电子态有显著差异,其响应时间容易产生数量级变化.

随着势垒宽度增加,隧穿几率下降,电流崩塌也应随之减小.因此,研究不同势垒层厚度下的电流崩塌就能直接检验热电子隧穿模型. Tilak 等人^[20]用同样的材料和工艺制作了势垒层厚度分别为 10nm 和 20nm 的器件,发现薄势垒器件有显著的电流崩塌,在 8 GHz 下的饱和输出功率密度仅为 1.25 W/mm.而厚势垒器件的电流崩塌较小,输出功率密度提高到 2.65 W/mm. Coffie 等人^[21]在势垒层上制作 50nm 厚的 p 型帽层,消除了器件的电流崩塌. Joshin 等人^[22]在势垒层上加适当厚度和掺杂浓度的 n 型帽层,制成了在高漏偏压下无电流崩塌的 HFET,饱和输出功率高达 174 W. Shen 等人^[23]用极化工程制作厚达 250nm 的不掺杂 GaN 帽层,来

抑制势垒表面对沟道的影响,消除了电流崩塌.在 10 GHz 频率下给出 12 W/mm 的高输出功率密度.最近 Okamoto 等人^[24]制作了 35nm 的厚 AlGaIn 外沟道势垒层,消除了电流崩塌,器件输出功率提高到 197 W.这些工作证明了热电子隧穿电流崩塌模型.

3 各类异质结构的电子状态和电流崩塌

电流崩塌特性同异质结构有很大的关联. AlGaIn/InGaIn/GaN 双异质结 HFET^[25]的电流崩塌很弱.最近,Neuburger 等人^[26]用 Kelvin 探针测量了单、双异质结器件的瞬态表面势.发现单异质结 HFET 撤去栅压后表面势随时间显著改变,而双异质结器件的表面势却不随时间而变.图 4 中示出了双异质结器件的能带和二维电子气分布.计算中势垒层的组份比和厚度分别取为 0.3 和 30nm, InGaIn 沟道的 In 组份比为 0.1,厚 5nm.量子阱的形状和图 2 所示的单异质结显著不同.图 2 中阱左边的 AlGaIn 形成高势垒,右势垒较低,左右不对称.能量

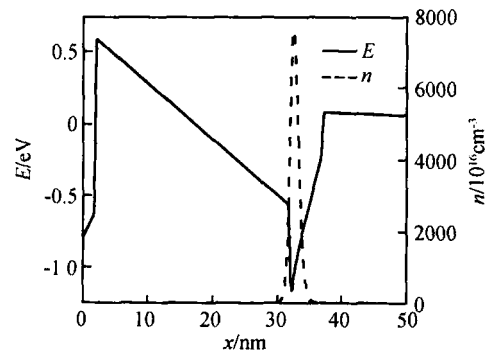


图 4 AlGaIn/InGaIn/GaN DHFET 的能带结构和二维电子气分布

Fig. 4 Energy band and two dimensional gases in AlGaIn/InGaIn/GaN DHFET

高于右势垒的激发态波函数向右扩展,形成密集的、准连续的子能带.计算得知第 50 个高激发子带才能产生隧穿跃迁.而在图 4 所示的双异质结中,沟道右边的异质结也形成一个高势垒,使阱结构对称化.强化了量子阱的量子限制.子带间的能级差增大,第三个子带就高于表面能级.在 Monte Carlo 模拟中,单异质结准连续子带的散射过程和三维情形近似,散射几率比较大.而双异质结的二维特性加强,带间跃迁锐减,隧穿到表面态的电子较少.因此 Neuburger

等人也就没有测到表面势的变化,可见显著抑制了器件的电流崩塌.

Fan 等人^[27] 制作了 掺杂 AlGaIn/ GaN MOSHFET,在直至 30V 漏电压下没有观察到电流崩塌.图 5 中的实线和虚线分别表示不掺杂和 $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 掺杂的异质结能带. 掺杂所产生的面电荷使能带变化斜率在掺杂点产生一个突变,强化了二维电子气的量子限制.图 6 中的实线和虚线分别示出其表面态和产生隧穿的高激发态波函数.和图 2 相比,容易看出,量子阱的结构变化将激发态波函数向右推,离表面态波函数较远,减弱了隧穿几率和电流崩塌.

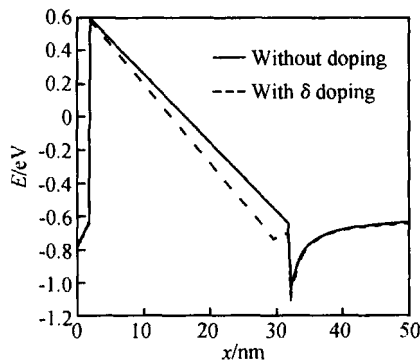


图 5 掺杂和不掺杂异质结能带的比较

Fig. 5 Energy bands for doping and unintentional doping heterostructures

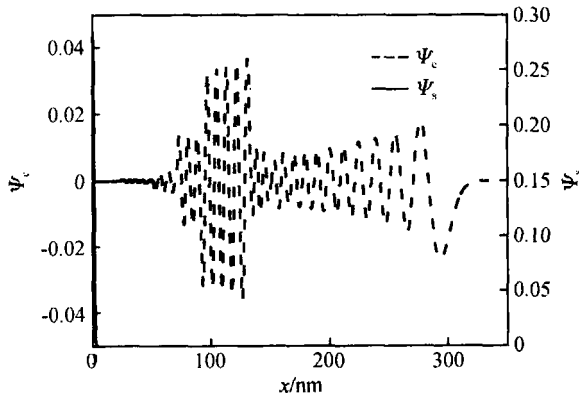


图 6 掺杂异质结中表面态和沟道电子气激发态的波函数

Fig. 6 Wave functions for surface state and excited sub band in channel in doping heterostructure

AlGaIn/ AlN/ GaN HFET 用薄 AlN 隔离层来阻止波函数渗入势垒层,抑制合金散射,提高迁移率.最近 Lee 等人^[28] 发现 AlN 隔离层能阻止沟道电子转移到表面态,显著降低器件的电流崩塌.图 7 中的实线和虚线分别表示加 2nm AlN 隔离层异质

结构的能带和电子气分布. AlN/ GaN 异质结的高能带带阶和强极化电荷抬高了左势垒高度,产生更强的二维电子气.图 8 中的实线和虚线分别表示表面态和高激发子带的波函数.波函数峰右移和隔在中间的 AlN 高势垒降低了隧穿几率,显著抑制了器件的电流崩塌.

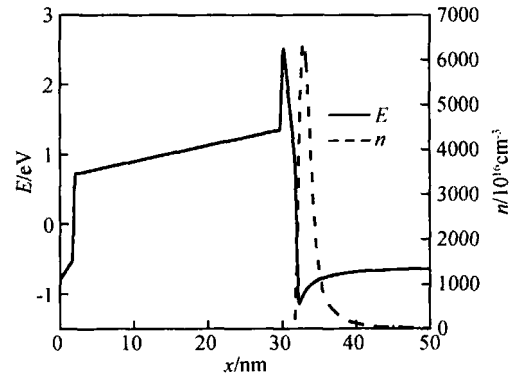


图 7 AlGaIn/ AlN/ GaN 异质结能带和二维电子气分布

Fig. 7 Energy band and two dimensional gases in AlGaIn/ AlN/ GaN heterostructure

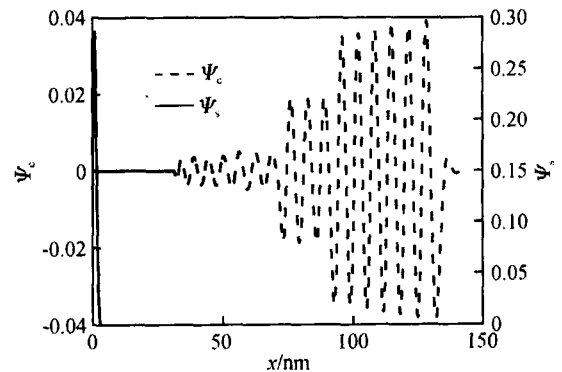


图 8 AlGaIn/ AlN/ GaN 异质结构的表面态和沟道高激发子带的波函数

Fig. 8 Wave functions for surface state and highly excited sub band in AlGaIn/ AlN/ GaN heterostructure

4 讨论

热电子隧穿模型包含了沟道电子气和二维表面态、强电场下的热电子效应、子带间的跃迁以及沟道电子气与表面态间的隧穿过程.有丰富的物理内涵,建立了同异质结构、器件工作状态、热电子效应等的关联,解释了目前实验中观察到的大量电流崩塌现象.

许多作者认为氮化物异质结中的极化电荷引起电流崩塌,希望用掺杂或其它方法来弱化极化电荷

的作用. 笔者认为极化电荷对强化二维电子气是有功的, 不应该去弱化它. 用热电子隧穿模型来分析, 只要适当设计异质结构, 降低沟道电子在子带间的跃迁几率, 减少沟道电子气隧穿到表面态的几率和表面态密度, 就能有效抑制电流崩塌. 双异质结构、掺杂结构和 AlN 隔离层结构就是这方面的有效例子, 掺杂不如异质结剪裁的作用强. Fan 等人^[27]也发现漏压超过 30V 后就不能消除电流崩塌. Kohn 等人^[29]在研究器件的瞬态特性时就提出了用掺杂或制作双极异质结构的方法来弱化极化电荷的各种方案. 用双极异质结构消除了电流崩塌, 制成了瞬态开关性能很好的器件. 这类异质结构比较复杂, 目前的器件性能还不能同单异质结媲美. AlN 隔离层研究又提出了用高势垒层来降低隧穿几率, 抑制电流崩塌的新思路. 薄 AlN 隔离层既抑制了势垒层的合金散射, 提高了电子气的迁移率, 又通过 AlN 高势垒和强极化电荷增大了电子气浓度, 得到了较好的射频性能.

电流崩塌是由于外沟道夹断以后不易打开造成的, 直接与栅对沟道的控制力度有关. 减薄势垒能增强栅对内沟道的控制, 提高跨导. 但虚栅对外沟道的影响也增大, 电流崩塌显著. 增加势垒层厚度来抑制电流崩塌时, 栅对内沟道的控制也减弱, 跨导就减小. 我们希望增强栅电极对内沟道的控制力度来提高器件的跨导. 而对外沟道则希望它永远被打开, 以降低栅-漏串联电阻和消除电流崩塌. 容易推断, 如果外沟道的电子气浓度大于内沟道, 则当内沟道被夹断时耗尽层电场就不易向外沟道扩展, 降低内、外沟道边缘的电场. 由此, 不仅抑制了热电子和电流崩塌的产生, 也降低了栅-漏串联电阻, 提高了器件工作的稳定性和可靠性. 于是提出了独立设计内、外沟道异质结构的新思路. 使用挖槽工艺可以分别制作不同的内、外沟道势垒. 最近, Okamoto 等人^[24]制作挖槽栅 AlGaIn/GaN HFET, 显著改善了高漏电压下的器件性能, 同本文的设计思想一致.

参考文献

- [1] Binari S C, Ikossi K, Roussos J A, et al. Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3): 465
- [2] Vetry R, Zhang N Q, Keller S, et al. The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3): 560
- [3] Daumiller I, Theron D, Gaquiere C, et al. Current instabilities in GaN-based devices. *IEEE Electron Device Lett*, 2001, 22(2): 62
- [4] 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
- [5] Klein P B, Mittereder J A, Binari S C, et al. Photoionization spectroscopy of traps in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors grown by molecular beam epitaxy. *Electron Lett*, 2003, 39(18): 1354
- [6] Vertiatichik A V, Eastman L F, Schaff W J, et al. Effect of surface passivation of AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor. *Electron Lett*, 2002, 38(8): 388
- [7] Okino T, Ochiai M, Ohno Y, et al. Drain current DLTS of AlGaIn-GaN MIS-HEMTs. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(8): 523
- [8] Kim H, Thompson R M, Tilak V, et al. Effects of SiN_x passivation and high-electric field on AlGaIn-GaN HFET degradation. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(7): 421
- [9] Sahoo D K, Lal R K, Kim H, et al. High-field effects in silicon nitride passivated GaN MODFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(5): 1163
- [10] 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
- [11] Mizutani T, Ohno Y, Akita M, et al. A study on current collapse in AlGaIn/GaN HEMTs induced by bias stress. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(10): 2015
- [12] Koley G, Cha H Y, Tilak V, et al. Modulation of surface barrier in AlGaIn/GaN heterostructures. *Phys Status Solidi*, 2002, 234(3): 734
- [13] Tarakji A, Simin G, Ilinskaya N, et al. Mechanism of radio-frequency current collapse in GaIn-AlGaIn field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(15): 2169
- [14] Xue Fangshi. Two dimensional surface states in 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]
- [15] Okino T, Ochiai M, Ohno Y, et al. Drain current DLTS of AlGaIn-GaN MIS-HEMTs. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(8): 523
- [16] Koley G, Tilak V, Eastman L F, et al. Slow transients observed in AlGaIn/GaN HFETs: effects of SiN_x passivation and UV illumination. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(4): 886
- [17] Simin G, Koudymov A, Tarakji A, et al. Induced strain mechanism of current collapse in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(16): 2651
- [18] Wu Y F, Saxler A, Moore M, et al. 30-W/mm GaN HEMTs by field plane optimization. *IEEE Electron Device Lett*, 2004,

- 25(3) :117
- [19] Chini A ,Buttari D ,Coffie R ,et al. Power and linearity characteristics of field-plated recessed-gate AlGaIn-GaN HEMTs. *IEEE Electron Device Lett* ,2004 ,25(5) :229
- [20] Tilak V ,Green B ,Kaper V ,et al. Influence of barrier thickness on the high-power performance of AlGaIn/ GaN HEMTs. *IEEE Electron Device Lett* ,2004 ,22(11) :504
- [21] Coffie R ,Buttari D ,Heikman S ,et al. p-capped GaIn-AlGaIn-GaN high-electron mobility transistors. *IEEE Electron Device Lett* ,2004 ,23(10) :588
- [22] Joshin K ,Kikkawa T ,Hayashi H ,et al. A 174W high-efficiency GaN HEMT power amplifier for WCDMA base station applications. *International Electron Devices Meeting* , 2003. Technical Digest :12. 6. 1
- [23] Shen L ,Coffie R ,Buttari D ,et al. High-power polarization-engineered GaIn/ AlGaIn/ GaN HEMTs without surface passivation. *IEEE Electron Device Lett* ,2004 ,25(1) :7
- [24] Okamoto Y ,Ando Y ,Nakayawa T ,et al. High-power recessed-gate AlGaIn-GaN HFET with a field-modulating plate. *IEEE Trans Electron Devices* ,2004 ,51(12) :2217
- [25] Simin G ,Hu X ,Tarakji A ,et al. AlGaIn/ InGaIn/ GaN double heterostructure field-effect transistor. *Jpn J Appl Phys* ,2001 ,40(11A) :L1142
- [26] Neuburger M ,Daumiller I ,Zimmermann T ,et al. Surface stability of InGaIn-channel based HFETs. *Electron Lett* ,2003 ,39(22) :1614
- [27] Fan Z Y ,Li J ,Lin J Y ,et al. Delta-doping AlGaIn/ GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with high breakdown voltages. *Appl Phys Lett* ,2002 ,81(24) :4649
- [28] Lee J S ,Kim J W ,Lee J H ,et al. Reduction of current collapse AlGaIn/ GaN HFETs using AlN interfacial layer. *Electron Lett* ,2003 ,39(9) :750
- [29] Kohn E ,Daumiller I ,Kunze M ,et al. Transient characteristics of GaIn-based heterostructure field-effect transistors. *IEEE Trans Microw Theory Tech* ,2003 ,51(2) :634

Hot Electron Tunneling Mechanism of Current Collapse in GaN HFET

Xue Fangshi

(*Nanjing Electronic Devices Institute , Nanjing 210016, China*)

Abstract : Two electron transition processes between channel and surface states in GaN HFET:hot electron tunneling and surface to band edge transition are investigated. Based on the tunneling between channel hot electrons and surface states ,a new microscope mechanism of current collapse is proposed. Various experimental behaviors of photoionization spectroscopy ,DL TS , transient current ,and current collapse are explained by this microscopic mechanism. The different current collapse behaviors are investigated for various heterostructures ,from which the optimized design of GaN HFET without current collapse is discussed.

Key words : current collapse ; transient current ; hot electron tunneling ; GaN HFET

EEACC : 2560S ; 2520D ; 2550E

Article ID : 0253-4177(2005)11-2143-06