

07

## Влияние длины затвора на скорость инжекции электронов в каналах полевых транзисторов на основе AlGaN/AlN/GaN

© С.В. Михайлович, Р.Р. Галиев, А.В. Зуев, А.Ю. Павлов,  
Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин<sup>¶</sup>

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,  
Москва

<sup>¶</sup> E-mail: e-mail: khabibullin@isvch.ru

Поступило в Редакцию 1 февраля 2017 г.

Исследованы полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе AlGaN/AlN/GaN с разной длиной затвора  $L_g$ . Значения максимальных частот усиления по току  $f_T$  и однонаправленного коэффициента усиления  $f_{max}$  составили 88 и 155 GHz для транзисторов с  $L_g = 125$  nm и 26 и 82 GHz для транзисторов с  $L_g = 360$  nm соответственно. На основе измеренных  $S$ -параметров проведена экстракция значений элементов малосигнальных эквивалентных схем AlGaN/AlN/GaN HEMT и определена зависимость скорости инжекции  $v_{inj}$  от напряжения затвор–исток. Также исследовано влияние длины затвора и напряжения между стоком и истоком на величину  $v_{inj}$ .

DOI: 10.21883/0000000000

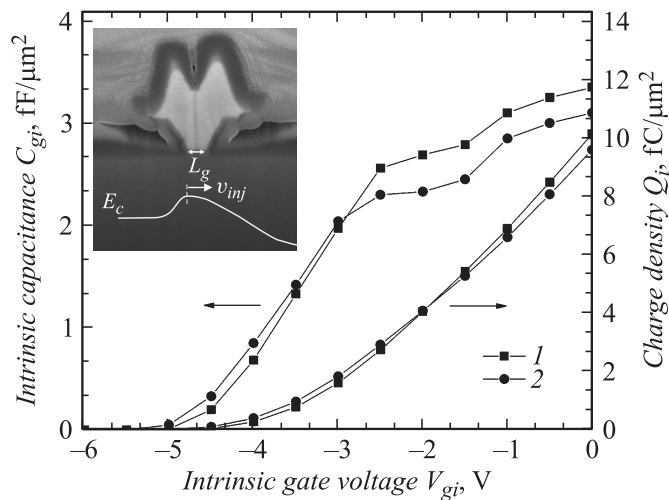
Широкозонные гетероструктуры на основе нитрида галлия обладают рядом уникальных свойств, в частности высокой плотностью двумерного электронного газа, высоким пробивным напряжением, большой скоростью электронов и т.д. Благодаря этому полупроводниковые СВЧ-приборы на их основе хорошо зарекомендовали себя в низкочастотной области спектра (до 15 GHz) [1]. Современные технологии для вертикального и горизонтального масштабирования полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе GaN позволили расширить область использования GaN HEMT в миллиметровом диапазоне длин волн (от 30 до 300 GHz). В частности, было существенно снижено сопротивление омических контактов (до  $0.026 \Omega \cdot \text{mm}$ ) путем использования технологии повторного эпитаксиального выращивания высоколегированного

контактного слоя  $n^+$ -GaN. Была разработана самосовмещенная технология изготовления затвора и омических контактов, способствовавшая уменьшению сопротивления доступа к подзатворной области канала до  $0.1\Omega \cdot \text{mm}$ , а также была уменьшена длина затвора до 20 nm [2,3].

Одной из важных характеристик GaN НЕМТ, определяющих максимально возможную частоту усиления по току, является скорость электронов в подзатворной области канала [4]. Характерное значение этой скорости для GaN НЕМТ составляет порядка  $10^7 \text{ cm/s}$ . По сути, это скорость инжекции электронов в подзатворную область НЕМТ из верхней точки потенциального барьера, расположенной на границе затвора со стороны истока („виртуальный исток“), как показано на вставке к рис. 1.

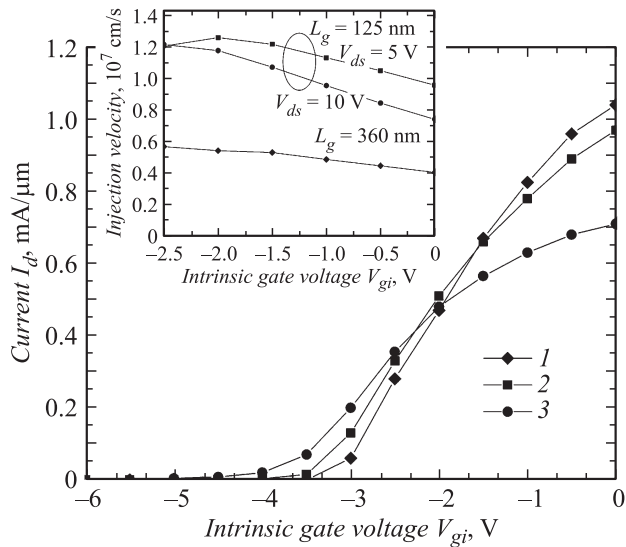
В настоящей работе исследовано влияние длины затвора  $L_g$  на скорость инжекции электронов в подзатворную область канала AlGaN/AlN/GaN НЕМТ миллиметрового диапазона длин волн. Для этого были изготовлены полевые транзисторы на основе гетероструктуры  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  с толщиной барьерного слоя 14 nm, подвижностью электронов  $2000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  и концентрацией  $1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , измеренными при температуре 300 К. Сопротивление несплавных омических контактов изготовленных транзисторов составляло  $0.18\Omega \cdot \text{mm}$ . Слоеое сопротивление канала составило  $300\Omega/\square$ . Технология изготовления транзисторов описана в [5,6]. Исследовалось два типа транзисторов с длиной Т-образных затворов 125 и 360 nm. Ширина затворов в обоих случаях была  $2 \times 50 \mu\text{m}$ . Для транзисторов с  $L_g = 125 \text{ nm}$  максимальные частоты усиления по току и однонаправленного коэффициента усиления составили  $f_T = 88 \text{ GHz}$  и  $f_{\text{max}} = 155 \text{ GHz}$  соответственно. Для транзисторов с  $L_g = 360 \text{ nm}$  значения  $f_T = 26 \text{ GHz}$  и  $f_{\text{max}} = 82 \text{ GHz}$ . Значение крутизны изготовленных транзисторов составило  $410 \text{ mS/mm}$ .

Для определения скорости инжекции электронов был использован метод, разработанный для НЕМТ на основе фосфида индия [7]. Экстракция значений элементов малосигнальных эквивалентных схем AlGaN/AlN/GaN НЕМТ для каждой заданной рабочей точки на основе измеренных  $S$ -параметров производилась методом, описанным в работах [8,9]. Исходя из значений элементов эквивалентных схем определялась полная емкость затвора ( $C_g$ ), равная сумме емкостей затвор–исток и затвор–сток. По зависимости  $C_g$  от напряжения между затвором и истоком ( $V_{gs}$ ) при неизменном напряжении между стоком и



**Рис. 1.** Зависимость внутренней емкости затвора  $C_{gi}$  и плотности заряда в подзатворной области  $Q_i$  от напряжения  $V_{gi}$  между затвором и истоком без учета падения напряжения на омическом контакте со стороны истока для транзисторов с длиной затвора 125 нм. 1 — напряжение между стоком и истоком 5 В, 2 — 10 В. На вставке показана фотография Т-образного затвора и схематично изображена скорость инжекции электронов  $v_{inj}$  в точке „виртуального истока“.

истоком определялась паразитная составляющая емкости  $C_{g0}$ , которая связана с геометрией затвора и диэлектрической пленкой вокруг него и не зависит от  $V_{gs}$ . Затем вычислялось внутреннее значение емкости  $C_{gi} = C_g - C_{g0}$ . Далее, интегрируя удельное (на единицу площади затвора) значение емкости  $C_{gi}$  по напряжению между затвором и истоком без учета падения напряжения на омическом контакте со стороны истока ( $V_{gi} = V_{gs} - I_d R$ ), мы получили слоевую плотность заряда в подзатворной области  $Q_i$ , как показано на рис. 1. На рис. 2 представлена зависимость удельного (на единицу ширины затвора) тока стока  $I_d$  от  $V_{gi}$ . Среднее значение скорости инжекции электронов в подзатворную область со стороны истока, согласно [7], равно отношению тока стока к плотности заряда:  $v_{inj} = I_d / Q_i$ . Поделив значения тока стока



**Рис. 2.** Зависимость тока стока  $I_d$  от внутреннего напряжения на затворе  $V_{gi}$ . 1 — значения для транзистора с длиной затвора 360 нм при напряжении сток–исток 5 В, 2 и 3 — значения для транзисторов с длиной затвора 125 нм при напряжении сток–исток 5 и 10 В соответственно. На вставке показана вычисленная скорость инжекции электронов в подзатворную область в зависимости от  $V_{gi}$ . Для транзисторов с длиной затвора 360 нм зависимость показана для напряжения сток–исток  $V_{ds} = 5$  В.

(рис. 2) на значения плотности заряда (рис. 1), мы получили величину скорости инжекции электронов в зависимости от  $V_{gi}$  (вставка на рис. 2).

Как видно из вставки к рис. 2, скорость инжекции для изготовленных AlGaIn/AlIn/GaN НЕМТ находится в диапазоне от  $0.6 \cdot 10^7$  до  $1.3 \cdot 10^7$  см/с. Для транзистора с  $L_g = 125$  нм скорость инжекции электронов примерно в 2 раза больше, чем в случае  $L_g = 360$  нм. Это связано с тем, что при уменьшении длины затвора транзистор начинает работать в баллистическом режиме, что приводит к росту  $v_{inj}$ . Кроме того, для всех транзисторов наблюдается уменьшение  $v_{inj}$  при приближении напряжения на затворе  $V_{gi}$  к нулю, что связано с увеличением рассеяния электронов на фононах из-за разогрева кристаллической решетки током, протекающим в канале транзистора (рис. 2).

Рассмотрим теперь зависимости  $v_{inj}$  от  $V_{gi}$  для двух напряжений  $V_{ds} = 5$  и  $10$  В между стоком и истоком транзистора с длиной затвора  $L_g = 125$  нм (см. вставку к рис. 2). Видно, что увеличение  $V_{ds}$  приводит к более резкому уменьшению  $v_{inj}$  при увеличении  $V_{gi}$ . Это можно связать с тем, что при большем  $V_{ds}$  электроны приобретают большую энергию и переходят во вторую подзону размерного квантования, волновая функция которой менее локализована в квантовой яме по сравнению с волновой функцией электронов первой подзоны размерного квантования. Это приводит к возрастанию рассеяния электронов на флуктуациях состава барьерного слоя AlGaIn и соответствующему снижению  $v_{inj}$ .

Следует отметить, что для транзисторов с  $L_g = 360$  нм зависимость  $v_{inj}$  от  $V_{gi}$  более пологая, чем в случае  $L_g = 125$  нм. Это можно объяснить следующим образом. При расчетах значения удельной емкости затвора  $C_{gi}$  были использованы геометрические размеры затвора (т.е. размеры напыленного металла). При этом в случае „короткого“ затвора ( $L_g = 125$  нм) нужно дополнительно учитывать влияние короткоканальных эффектов, когда форма подзатворного потенциального барьера зависит от  $V_{ds}$  и  $V_{gi}$ . Следовательно, можно предположить, что различие в скорости спада зависимости  $v_{inj}$  от  $V_{gi}$  при одинаковом  $V_{ds} = 5$  В для  $L_g = 125$  и  $360$  нм связано с необходимостью введения эффективной длины затвора для  $L_g = 125$  нм.

Таким образом, в работе показано, что уменьшение длины затвора примерно в 3 раза приводит к двукратному возрастанию скорости инжекции электронов в подзатворной области канала AlGaIn/AlIn/GaN HEMT.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0124, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0124).

## Список литературы

- [1] Quay R. Gallium nitride electronics. Berlin–Heidelberg: Springer, 2008. 469 p.
- [2] Shinohara K., Regan D.C., Yan Tang R. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. V. 60. N 10. P. 2982–2996.
- [3] Lee D.S., Liu Z., Palacios T. // Jpn. J. Appl. Phys. 2014. V. 53. N 10. P. 100212 (1–10).

- [4] *Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 4. С. 217–226.
- [5] *Томош К.Н., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Хабибуллин Р.А.* и др. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1434–1438.
- [6] *Галиев Р.Р., Ячменев А.Э., Бугаев А.С.* и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 4. С. 522–524.
- [7] *Kim D.-H., del Alamo J.A., Antoniadis D.A., Brar B.* // IEEE IEDM Tech. Dig. 2009. P. 861–864.
- [8] *Михайлович С.В., Фёдоров Ю.В., Бугаев А.С.* и др. // Докл. ТУСУР. 2011. Т. 2. № 2. Ч. 2. С. 31–35.
- [9] *Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 12–17.