

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[¶]

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Москва

[¶] 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/PJTF.2017.16.44927.16727

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 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 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

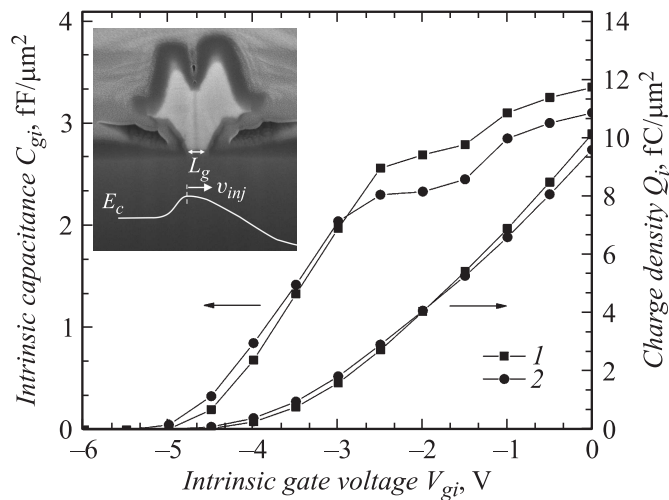


Рис. 1. Зависимость внутренней емкости затвора C_{gi} и плотности заряда в подзатворной области Q_i от напряжения V_{gi} между затвором и истоком без учета падения напряжения на омическом контакте со стороны истока для транзисторов с длиной затвора 125 нм. 1 — напряжение между стоком и истоком 5 В, 2 — 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

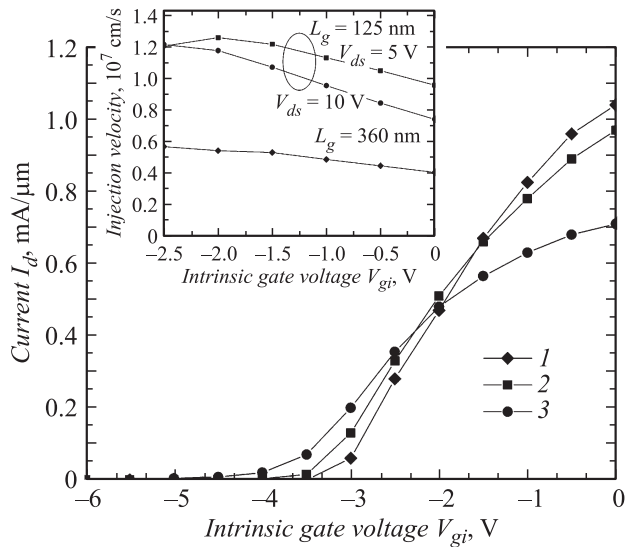


Рис. 2. Зависимость тока стока I_d от внутреннего напряжения на затворе V_{gi} . 1 — значения для транзистора с длиной затвора 360 нм при напряжении сток–исток 5 В, 2 и 3 — значения для транзисторов с длиной затвора 125 нм при напряжении сток–исток 5 и 10 В соответственно. На вставке показана вычисленная 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.