

# Подавление эффекта квазинасыщения вольт-амперных характеристик мощных сверхвысокочастотных латеральных транзисторов

© Р.П. Алексеев<sup>1</sup>, М.И. Черных<sup>1</sup>, А.Н. Цоцорин<sup>1</sup>, И.В. Семейкин<sup>1</sup>, Г.В. Быкадорова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество „Научно-исследовательский институт электронной техники“, 394033 Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет, 394018 Воронеж, Россия

E-mail: arp@niiet.ru

Поступила в Редакцию 5 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2021 г.

Принята к публикации 12 апреля 2021 г.

Проведен анализ электропараметров нового поколения СВЧ LDMOS-транзисторов, разработанных АО „НИИЭТ“. Выявлено существенное подавление эффекта квазинасыщения переходной и выходной вольт-амперной характеристики по сравнению с приборами предыдущего поколения. Сравнение с прибором зарубежного производства показывает, что достигнутые результаты близки к мировому уровню.

**Ключевые слова:** мощные СВЧ транзисторы, LDMOS-технология, квазинасыщение вольт-амперной характеристики.

DOI: 10.21883/FTP.2021.08.51141.9658

## 1. Введение

Начиная с 1990-х годов LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors) технология является доминирующей на рынке мощных СВЧ транзисторов. Развитие в последние годы технологий на основе широкозонных полупроводниковых материалов, в частности на нитриде галлия, привело к частичной потере LDMOS-транзисторами своих позиций, тем не менее о прекращении их развития и тем более производства в обозримом будущем говорить не приходится. Так, зарубежные производители LDMOS-транзисторов в настоящее время начали осваивать диапазон частот до 5 ГГц [1], традиционно отводимый под приборы на основе нитрида галлия и арсенида галлия.

Одной из проблем LDMOS-транзисторов, мало освещенной в отечественной литературе, является эффект квазинасыщения (анг. Quasi-saturation) вольт-амперных характеристик (ВАХ) [2]. Эффект квазинасыщения ВАХ LDMOS-транзистора может быть представлен как два отдельных, но взаимосвязанных эффекта: квазинасыщение переходной ВАХ и квазинасыщение выходной ВАХ. Квазинасыщение переходной ВАХ заключается в появлении на ВАХ участка слабой зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения на затворе  $U_G$  при достижении  $U_G$  определенного значения. Это объясняется тем, что при некотором значении напряжения на затворе плотность инжектированных носителей заряда превысит концентрацию примеси в относительно слабо легированной LDD (Lightly Doped Drain) области. При дальнейшем повышении  $U_G$  суммарное поле носителей заряда начинает экранировать исток от напряжения на стоке  $U_D$ . Таким образом, повышение напряжения на

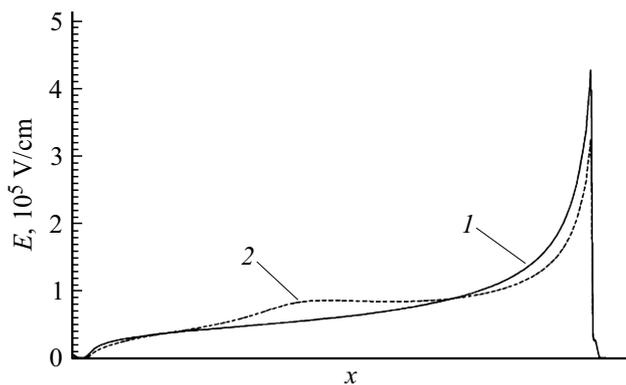
затворе уменьшает тянущее поле стока, что в конечном итоге вызывает насыщение переходной ВАХ, независимо от того достигла ли дрейфовая скорость носителей заряда насыщения или нет [3].

Квазинасыщение выходной ВАХ заключается в отсутствии на ней участка идеального насыщения: ВАХ прибора подобна характеристике классического короткоканального MOS-транзистора. Как и в MOS-транзисторах, в LDMOS-транзисторах насыщение выходной характеристики вызывается достижением насыщения дрейфовой скорости носителей заряда. Однако в LDMOS-транзисторах скорость носителей достигает максимума не в канале, а в том или ином участке LDD-области (в зависимости от значения  $U_G$ ) и не может вызвать полного насыщения тока стока [4].

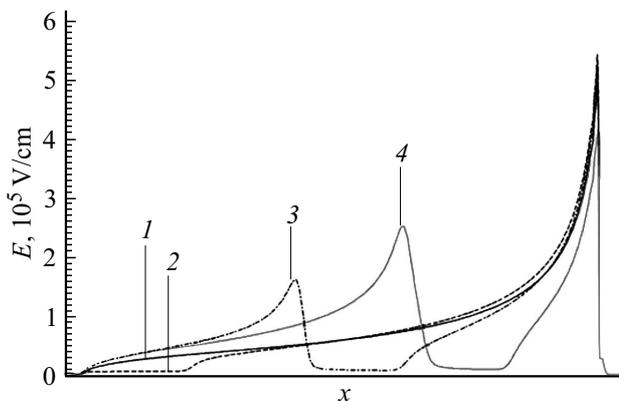
Квазинасыщение переходной и выходной ВАХ мощного LDMOS-транзистора невозможно полностью подавить, однако подбором конструктивно-технологических параметров его проявления можно существенно ослабить.

## 2. Возможные пути ослабления эффекта квазинасыщения

АО „НИИЭТ“ совместно с ПАО „Микрон“ за счет собственных средств провел инициативные работы по модернизации и оптимизации конструкции СВЧ LDMOS-транзисторов собственной разработки с целью соответствовать уровню ведущих зарубежных производителей. Проведенная работа позволила добиться существенного улучшения основных как электростатических (напряжение пробоя сток–исток, сопротивление



**Рис. 1.** Распределение напряженности электрического поля вдоль LDD-области ( $U_D = 50$  В,  $U_G = 15$  В): 1 — без полевого электрода, 2 — с полевым электродом.



**Рис. 2.** Распределение напряженности электрического поля вдоль LDD-области при разных положения HDD-участка: 1 — без HDD, 2 — HDD около затворного края LDD-области, 3 — HDD в середине LDD-области, 4 — HDD около стокового края LDD-области.

сток—исток в открытом состоянии, ток стока насыщения), так и энергетических (максимальная выходная мощность, коэффициент усиления мощности, коэффициент полезного действия стока) параметров приборов [5]. Однако внесенные конструктивные изменения были направлены не только на повышение основных параметров транзистора, но и на подавление нежелательных физических эффектов, происходящих при работе транзистора, в том числе эффект квазинасыщения ВАХ.

Одним из конструктивных элементов, способных в наибольшей степени повлиять на степень выраженности квазинасыщения, является полевой электрод. Во-первых, включение полевого электрода позволяет повысить концентрацию примеси в LDD-области, что обусловлено ростом оптимальной концентрации примеси, при которой напряжение пробоя сток—исток достигает максимума. Повышение концентрации примеси в LDD-области является наиболее эффективным способом ослабления эффекта квазинасыщения. Во-вторых, наличие полевого

электрода приводит к перераспределению напряженности электрического поля в LDD-области (рис. 1), в результате чего основной пик напряженности электрического поля уменьшается, появляется дополнительный пик, соответствующий положению края полевого электрода.

Варьируя протяженность полевого электрода, толщину межслойного диэлектрика под ним, а также меняя его конструкцию (ступенчатая, многослойная и др. [6]), можно добиться более равномерного распределения напряженности поля при том или ином напряжении на затворе  $U_G$ , что способствует подавлению квазинасыщения.

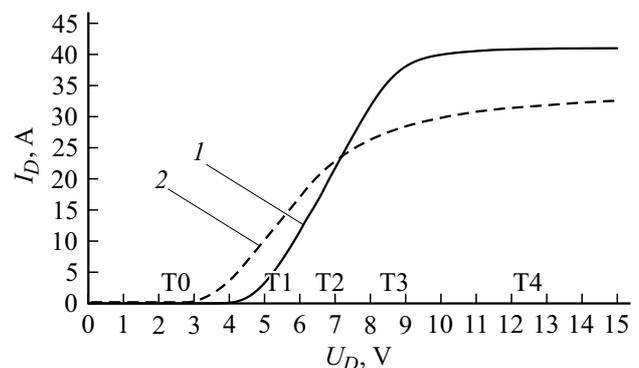
Другим способом ослабления эффекта квазинасыщения является формирование сложного профиля легирования LDD-области [6]. Как и в случае с полевым электродом, меняя протяженность LDD-области, концентрацию легирующей примеси и положение высоколегированного участка (HDD), можно добиться требуемого распределения напряженности поля вдоль LDD-области. Пример того, как сильно может меняться распределение напряженности поля, приведен на рис. 2.

### 3. Полученные результаты

Подбором вышеописанных конструктивно-технологических параметров удалось достичь существенного ослабления эффекта квазинасыщения. На рис. 3 приведена переходная ВАХ LDMOS-транзисторов новой ревизии в сравнении с характеристикой прибора предыдущего поколения. Оба транзисторных кристалла выполнены в одном форм-факторе, характеризуются одинаковым периметром затвора и собраны идентичным образом. Разница в значении тока стока насыщения заключается в большей удельной мощности новой конструкции.

Как видно из рис. 3, внесенные изменения позволили достичь более резкого насыщения переходной характеристики. Также возросла крутизна на линейном участке.

Семейства выходных ВАХ транзисторов предыдущей и новой разработки продемонстрированы на рис. 4. Так



**Рис. 3.** Выраженность квазинасыщения переходной ВАХ на приборах новой (1) и предыдущей (2) конструкции.

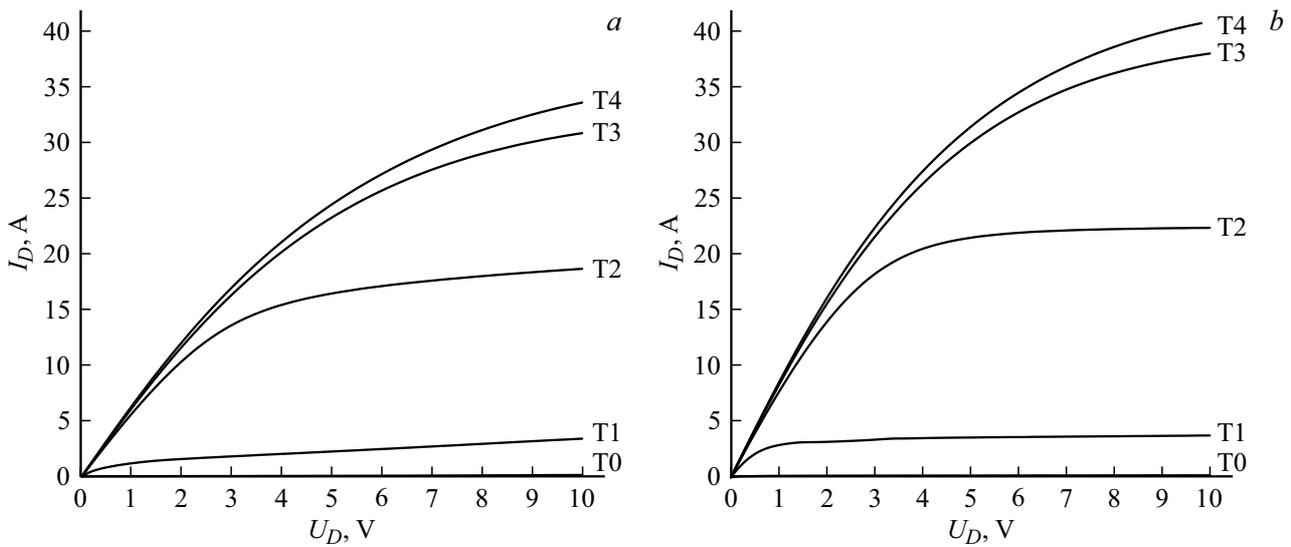


Рис. 4. Семейства выходных ВАХ приборов: *a* — предыдущей конструкции, *b* — новой конструкции.

Дифференциальные сопротивления LDMOS-транзисторов

Участок переходной ВАХ	$R_{out} (U_D = 8 \text{ В}), \text{ Ом}$		
	Предыдущая конструкция	Новая конструкция	BLF188XR
T1	12.0	102.5	68.3
T2	49.1	254.4	137.1
T3	23.9	30.4	18.2
T4	20.3	25.5	15.8

как сравниваемые приборы имеют различный уровень порогового напряжения, значения напряжения на затворе при построении выходных ВАХ выбирались не одинаковыми по значению, а одинаковыми по положению на переходной ВАХ. Первая точка T0 находится на подпороговом участке, вторая точка T1 — в начале линейного участка, T2 лежит на середине линейного участка, T3 находится на переходе линейного участка в насыщение, T4 — на участке полного насыщения переходной ВАХ (на рис. 3 отмечены точки для новой конструкции).

Для большей наглядности в таблице приведены дифференциальные выходные сопротивления  $R_{out}$ , рассчитанные по приведенным ВАХ в точке  $U_D = 8 \text{ В}$ . Также для сравнения указаны значения  $R_{out}$  для транзистора BLF188XR производства фирмы Ampleon [7]. Так как рассматриваемые транзисторы обладают разным значением тока стока насыщения, в таблице при расчете дифференциального сопротивления использовался нормированный ток:

$$R_{out} = dU_D / \frac{dI_D}{I_D} = \frac{I_D dU_D}{dI_D}$$

#### 4. Заключение

По данным таблицы видно, что внесенные изменения в конструкцию LDMOS-структуры привели к существенному подавлению эффекта квазинасыщения выходной ВАХ, особенно при напряжениях на затворе, соответствующих линейному участку переходной ВАХ (точки T1 и T2). Сравнение с зарубежным аналогом показывает, что достигнутые результаты близки к мировому уровню.

Таким образом, усовершенствованная конструкция LDMOS-транзисторов АО „НИИЭТ“ позволяет не только повысить их энергетические параметры, но и добиться снижения выраженности негативного эффекта квазинасыщения переходной и выходной вольт-амперных характеристик СВЧ-транзисторов.

#### Финансирование работы

Работа проводилась в рамках НИР „Исследование и разработка мощных СВЧ LDMOS-транзисторов с повышенным коэффициентом полезного действия в L-диапазоне частот и транзисторов на основе нитрида галлия для работы в L-, S- и C-диапазонах частот“ за счет собственных средств АО „НИИЭТ“.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

[1] S.J.C.H. Theeuwes, H. Mollee, R. Heeres, F. Van Rijs. EDI CON 2019 Beijing, April 2.  
 [2] B.K. Sampath, M. Shrivastava. IEEE Trans. Electron Dev., 65 (1), 191 (2018).

- [3] Р.П. Алексеев, А.Н. Цоцорин, Е.Н. Бормонтов, Г.В. Быкадорова. Электрон. техн., сер. 1, СВЧ-техника, **543** (4), 6 (2019).
- [4] Р.П. Алексеев, А.Н. Цоцорин, Е.Н. Бормонтов, Г.В. Быкадорова. Электрон. техн., сер. 1, СВЧ-техника, **543** (4), 15 (2019).
- [5] Р.П. Алексеев, А.Н. Цоцорин, М.И. Черных. Электроника НТБ, **00195** (4), 98 (2020).
- [6] Р.П. Алексеев, Е.Н. Бормонтов, Г.В. Быкадорова, А.Н. Цоцорин. В сб.: *Радиолокация, навигация, связь*. Матер. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. (Воронеж, Изд-во Вэлборн, 2018) т. 5, с. 257.
- [7] Сайт фирмы Ampleon [Электронный ресурс]. — (<https://www.ampleon.com>) (дата обращения 31.03.2021).

Редактор А.Н. Смирнов

### **Suppression of the effect of quasi-saturation of current-voltage characteristics of power radio frequency lateral transistors**

*R.P. Alekseev<sup>1</sup>, M.I. Chernykh<sup>1</sup>, A.N. Tsotsorin<sup>1</sup>,  
I.V. Semeikin<sup>1</sup>, G.V. Bykadorova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Joint-Stock Company  
„Scientific Research Institute of Electronic“,  
394033 Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Voronezh State University,  
394018 Voronezh, Russia

**Abstract** Was been performed the analysis of electric parameters of a new generation of RF LDMOS transistors developed by JSC „НИИЕТ“. In comparison with the devices of the previous generation was revealed a significant suppression of the effect of quasi-saturation of  $I_D-U_G$  and  $I_D-U_D$  characteristics. Comparison with a foreign-made device shows that the achieved results are close to the world level.