Исследование характеристик AlGaN/GaN СВЧ-транзисторов с полевыми электродами на подложке кремния

© М.Н. Журавлев[1], В.Е. Земляков[1], Н.В. Гуминов[1], А.А. Зайцев[1], Д.С. Шпаков[1], И.В. Макарцев[1], К.В. Дудинов[2], В.И. Егоркин[1]

[1] Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Москва, Зеленоград, Россия
[2] АО „НПП „Исток“ им. А.И. Шокина,
141190 Московская обл., Фрязино, Россия
E-mail: maxim@org.miet.ru

Поступила в Редакцию 17 июля 2025 г.
В окончательной редакции 27 августа 2025 г.
Принята к публикации 11 сентября 2025 г.

Исследован электрический пробой и СВЧ характеристики AlGaN/GaN-транзисторов с полевыми электродами различных конструкций, электрически соединенных с истоком через общую шину. Показано, что добавление полевых электродов увеличивает пробивное напряжение, повышает коэффициент усиления более чем на 2 дБ в диапазоне частот до 15 ГГц.

Ключевые слова: полевой электрод, нитрид галлия, GaN, мощный СВЧ HEMT, пробивное напряжение, максимально стабильное усиление.

DOI: 10.61011/FTP.2025.06.61574.8391

1. Введение

В настоящее время СВЧ-транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе AlGaN/GaN-гетероструктур активно используются в большой номенклатуре технических систем от бытовых радиостанций до базовых станций мобильной связи. При массовом производстве определяющей становится цена транзисторов и микросхем. В связи с этим активно развивается направление эпитаксиального роста и технологий литографии на кремниевых подложках диаметром 150 и 200 мм. Актуальной также стала задача разработки новых конструкций транзистора для увеличения рабочего напряжения до значений > 50 В, улучшения низкочастотных и высокочастотных параметров. Один из подходов к ее решению — использование дополнительных полевых электродов (field plate) [1]. Полевой электрод, электрически соединенный с затвором, понижает и сглаживает максимум в распределении напряженности электрического поля со стороны стока [2,3], увеличивая пробивное напряжение и подавляя коллапс тока. Также использование полевого электрода улучшает температурную стабильность транзистора [4]. Самой простой способ изготовления полевого электрода с минимумом технологических операций — изменение формы и уширение „шляпы“ Т-образного затвора [5]. Но это увеличивает емкости затвор–сток и затвор–исток, вызывая снижение усиления и крутизны, тем самым влияя на общие высокочастотные характеристики транзистора. Для одновременного улучшения частотных характеристик и пробивного напряжения полевой электрод и затвор разделяются в области активного канала и электрически соединяются по общей шине. При этом для каждого электрода можно подобрать оптимальную геометрию, соответствующую максимальному напряжению пробоя [2].

В этой работе мы изучали зависимости максимальных рабочих напряжений и СВЧ параметров нитридгаллиевых транзисторов от наличия (отсутствия) и конструкции дополнительного полевого электрода, электрически соединенного с истоком по общей шине. Все транзисторы изготавливались в едином технологическом цикле на кремниевой подложке. Для изготовления Т-образных затворов применялась электронная литография.

2. Теоретическая оценка пробивных напряжений

С помощью математического моделирования изучено распределение электрического поля и возникновение пробоя в AlGaN/GaN HEMT с Т-образным затвором и различными конструкциями полевого электрода. Параметры барьерного слоя ($Al_{0.27}Ga_{0.73}N$ толщиной 20 нм) были выбраны исходя из необходимости обеспечения высокой выходной СВЧ мощности. Геометрия электродов определялась доступной технологией изготовления. Расстояние сток–исток — 4 мкм, длина затвора — 0.25 мкм, ширина — 100 мкм, длина „шляпы“ затвора — 0.8 мкм, высота „ножки“ затвора — 100 нм, высота „шляпы“ — 200 нм. Рассматриваемые конструкции HEMT показаны на рис. 1: это простой Т-образный затвор (FP0), дискретный полевой электрод (FP1) и полевой электрод с перекрытием Т-образного затвора (FP2). В отличие от конструкции транзистора, рассмотренной в работах [2,3], полевой электрод электрически соединен с истоком с помощью общей шины вне области канала. Фотография

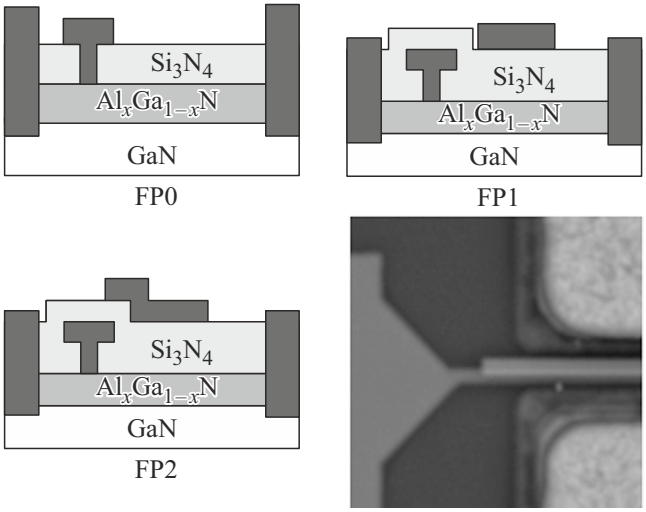

Рис. 1. Схематическое поперечное сечение изучаемых GaN HEMT и фотография внешнего вида тестового транзистора с конструкцией FP2.

внешнего вида транзистора с конструкцией FP2 показана на рис. 1. При изготовлении транзисторы пассивируются слоем плазмохимического нитрида кремния, покрывающим все конструктивные элементы. Толщина диэлектрика между полевым электродом и барьерным слоем гетероструктуры 300 нм.

Полевой электрод создает дополнительную емкость. Для поддержания хороших частотных характеристик эта емкость не должна превосходить 10–15 % от исходной емкости Т-образного затвора. Воспользовавшись для грубой оценки емкостей моделью плоского конденсатора между металлическим электродом и двумерным электронным газом, получим предельную длину полевого электрода 0.58–0.86 мкм. Для удобства проведения оптической литографии при изготовлении транзистора длина полевого электрода была выбрана равной 0.8 мкм. Расстояние между полевым электродом и затвором выбрано равным 1 мкм чтобы избежать преждевременного поверхностного пробоя при проведении экспериментов.

Моделирование проводилось с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) Sentaurus TCAD. Пьезоэлектрические константы материалов были взяты из работы [6]. Перенос заряда рассчитывался с помощью дрейфово-диффузионной модели. Глубокие примеси учитывались с помощью единственного акцепторного уровня углерода с энергией ионизации 0.9 эВ [7], описываемого в рамках модели Шокли–Рида–Холла. Углерод — преобладающая примесь с концентрацией 10^{17} см$^{-3}$, полностью компенсирующая донорные примеси кислорода и кремния в процессе роста приборной гетероструктуры. При проведении моделирования коэффициенты ударной ионизации для электронов и дырок в GaN задавались эмпирическим законом:

$$\alpha_{n,p} = \alpha_0 e^{-eE_{br}/|\nabla F_{n,p}|}$$

с подгоночными параметрами [8], полученными по результатам измерения фотоумножения в диоде с обратным смещением:

	α_n	α_p
α_0, см$^{-1}$	$2.69 \cdot 10^7$	$4.32 \cdot 10^6$
E_{br}, В/см	$2.27 \cdot 10^7$	$1.31 \cdot 10^7$

$F_{n,p}$ — квазиуровень Ферми для электронов и дырок.

Для каждой точки линии по длине транзисторной структуры от истока к стоку вычислялось максимальное значение напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения области двумерного электронного газа и барьерного слоя при напряжении на стоке 200 В. Соответствующее распределение показано на рис. 2. Из графика видно, что около ножки Т-затвора напряженность электрического поля максимальна. Как следствие, при дальнейшем повышении напряжения в этом месте начинается лавинная генерация носителей и происходит электрический пробой. Добавление в конструкцию транзистора дополнительного полевого электрода уменьшает максимальное значение напряженности электрического поля около ножки Т-затвора на 25 % с 7.9 до 5.9 МВ/см. Локальный максимум напряженности у края шляпки Т-затвора практически исчезает и перемещается к краю полевого электрода. Также на 10 % понижается максимальная напряженность электрического поля у стока с 6.6 до 6.0 МВ/см. Используя определение пробивного напряжения из работы [3], было показано

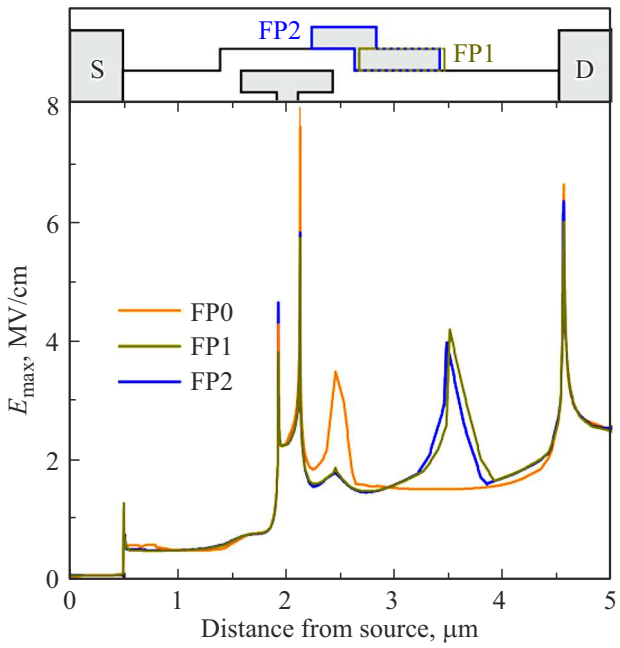

Рис. 2. Зависимость максимального значения напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения области двумерного электронного газа и барьерного слоя от расстояния между плоскостью сечения и истоком.

его увеличение с 240 до 280 В. При этом тип полевого электрода особого влияния на величину пробивного напряжения не оказывает. Это происходит потому, что смена конструкции полевого электрода меняет только положение и в меньшей степени абсолютное значение локального максимума напряженности электрического поля у края электрода.

3. Измерение токов утечки и напряжения деградации транзистора

Для оценки разброса значений параметров транзисторов на пластине изготавливалось 12 технологических модулей с одинаковой топологией. Каждый технологический модуль состоит из двух транзисторов с Т-образным затвором без полевых электродов (FP0), одного транзистора с дискретным полевым электродом (FP1) и одного транзистора с полевым электродом, перекрывающим Т-образный затвор (FP2). Напряжение отсечки изготовленных транзисторов практически не зависит от наличия (отсутствия) и конструкции полевого электрода и равно -3 В. Измерялся ток утечки I_L на стоке закрытых транзисторов при напряжении на затворе -5 В и напряжении на стоке 140 В. Условия эксперимента подбирались для проверки троекратного запаса надежности рабочего напряжения 50 В. Ток утечки — это практически самый важный параметр для мощных СВЧ транзисторов, вместе с током насыщения определяющий диапазон выходной мощности и рабочее напряжение транзистора. Обычно для безопасной и надежной работы напряжение стока необходимо поддерживать на уровне трети от пробивного напряжения.

Результаты измерения представлены в табл. 1. Символ „x“ означает, что ток стока тестового транзистора значительно превышает 100 мкА или 1 мА/мм ширины затвора, значение, соответствующее возникновению электрического пробоя сток–исток, затвор–сток, затвор–исток транзистора.

Посчитав количество символов „x“, можно оценить выход годных по пробивному напряжению. 10 нерабочих тестовых транзисторов из 48 означает выход годных $\sim 80\,\%$, что показывает хорошую проработку технологии изготовления и высокое качество гетероструктуры. Из табл. 1 не видно статистически значимого преимущества дополнительного полевого электрода и заметного влияния на уровень тока утечки (I_L) в режиме пробоя сток–исток. Минимальные значения тока в 2–3 мкА достигнуты на всех типах транзисторов, средние значения сравнимы и меньше для транзисторов без полевых электродов.

Из рис. 2 видно, что распределение электрического поля имеет ярко выраженные максимумы у стока и затвора. Для изучения лавинной генерации в режиме диодного включения между затвором и стоком подавалось обратное напряжение до начала деградации транзистора (необратимого роста тока). При деградации затвор транзистора плавится и выгорает. Фотография расплавленного затвора показана на рис. 3. Напряжение деградации (V_{DEG}) каждого транзистора фиксировалось и представлено в табл. 1. Большинство значений меньше теоретического предела, полученного по результатам расчетов в разд. 2. Это может быть связано как с непреднамеренным легированием приборной структуры донорными примесями (Si и O), наличием структурных дефектов, так и с заниженным значением констант ударной ионизации, используемых в расчетах.

Таблица 1. Токи утечки (I_L) и напряжение деградации (V_{DEG}) тестовых транзисторов

№	I_L, мкА				V_{DEG}, В			
	FPO		FP1	FP2	FPO		FP1	FP2
1	6	5	15	12	150	140	180	160
2	3	x	15	29	180	180	220	225
3	20	40	60	x	180	180	200	200
4	50	30	50	20	60	100	100	100
5	x	2	15	2	200	160	200	210
6	x	x	100	90	100	20	140	100
7	3	3	2	2	200	220	280	290
8	5	6	x	2	180	200	180	230
9	5	3	x	10	150	180	x	250
10	100	60	100	100	150	100	190	200
11	15	2	x	3	200	190	280	270
12	x	x	2	2	270	220	280	340

На рис. 4 все транзисторы отмечены точками в пространстве параметров (ток утечки I_L, напряжение выгорания V_{DEG}). Можно выделить общую тенденцию, при высоких токах утечки напряжение выгорания уменьшается. Соответствующие линии регрессии показаны на рис. 4. Таким образом, величину тока утечки можно использовать в качестве контрольного параметра при

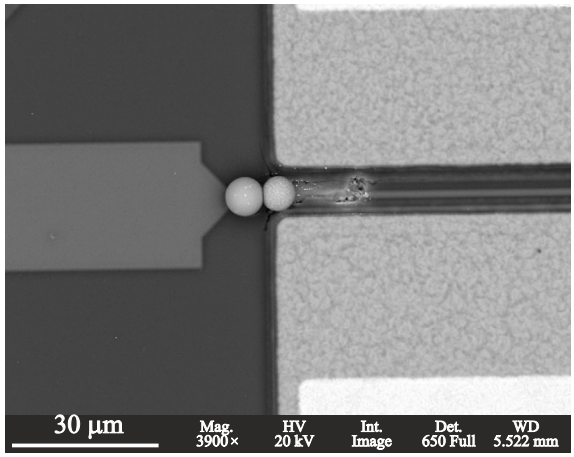

Рис. 3. Затвор транзистора после измерения необратимого роста тока стока.

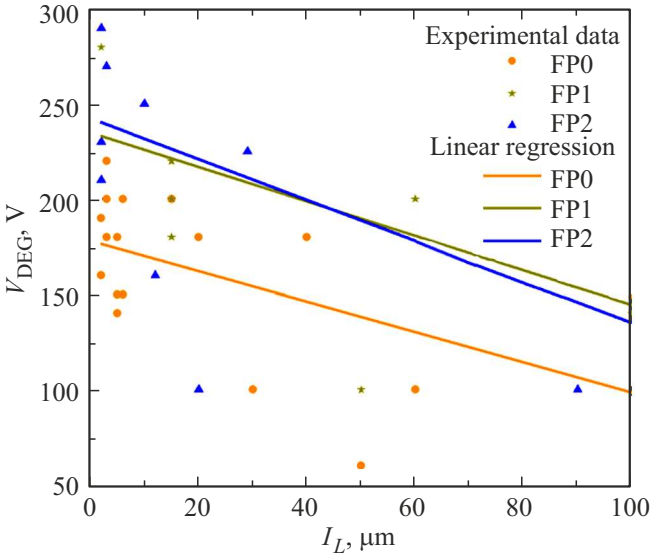

Рис. 4. Зависимость напряжения выгорания от тока утечки транзистора.

разбраковке транзисторов. Однако следует учитывать, что все транзисторы с токами утечки < 1 мА на миллиметр ширины затвора по-разному склонны к деградации. А именно для получения надежных приборов при отборе следует использовать меньшее значение I_L.

Сравнение линий регрессии показывает, что добавление полевого электрода в конструкцию транзистора в среднем приводит к увеличению напряжения деградации на 40–60 В во всем диапазоне токов утечки, что согласуется с результатами расчетов. Среднее значение V_{DEG} для транзисторов без полевого электрода (FP0) равно 162 В, для транзисторов с дискретным полевым электродом (FP1) — 204 В, для транзисторов с перекрытием затвора и полевого электрода (FP2) — 214 В. Таким образом, при изготовлении транзисторов с рабочим напряжением > 50 В необходимо использовать полевой электрод для создания запаса по надежности.

4. Измерение СВЧ параметров

Для проведения СВЧ измерения рассматриваемые транзисторы были смасштабированы и изготовлены с двухпальцевым затвором шириной 2×125 мкм. Все остальные конструктивные параметры не изменялись. Такая топология затвора удобнее по сравнению с однопальцевой для проведения СВЧ измерений в силу своей симметрии и соответствия конструкции СВЧ зондов. На рис. 5 представлены результаты измерений проходных характеристик и крутизны при напряжении на стоке 28 В. Добавление полевого электрода изменяет максимальную крутизну и ток насыщения менее чем на 5 %. Напряжение отсечки практически не меняется.

Рабочие точки для измерения малосигнальных СВЧ параметров выбраны вблизи максимума крутизны и показаны на рис. 5 символом „звездочка“. Измерения проводились на измерительном стенде на основе векторного анализатора цепей Keysight PNA-X N5244B и импульсных источников подачи питания Amcad AM3200 под управлением программной среды управления измерениями Amcad IVCAD. Были построены показанные на рис. 6 зависимости максимально стабильного усиления (MSG) от частоты. Из графика видно, что добавление полевого электрода в конструкцию транзистора повышает MSG более чем на 2 дБ в диапазоне частот до 15 ГГц.

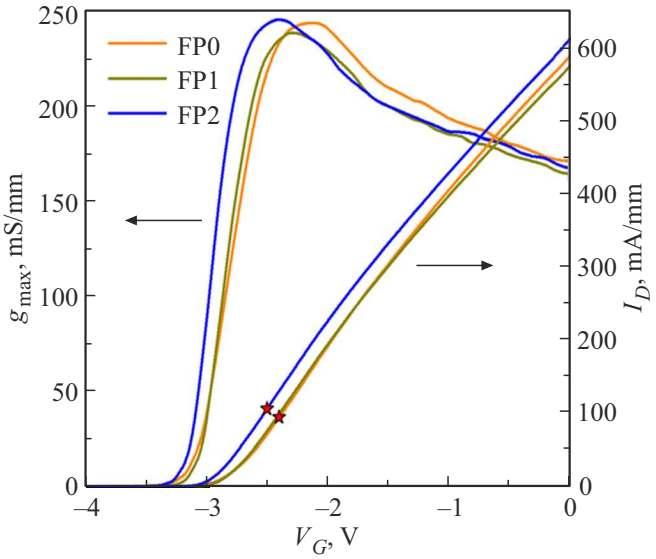

Рис. 5. Ток насыщения и крутизна тестового транзистора.

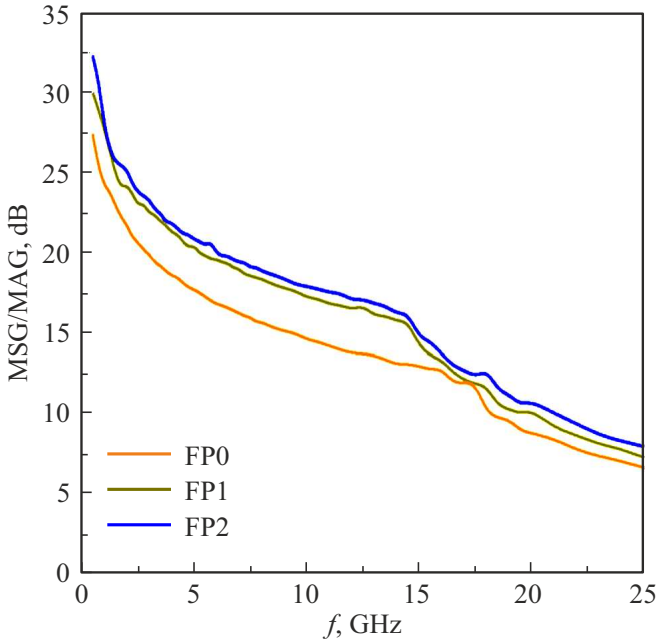

Рис. 6. Максимально стабильное усиление тестовых транзисторов.

Таблица 2. Результаты измерений методом активной нагрузки

	FP0	FP1	FP2
Выходная мощность, Вт/мм	5.55	5.37	6.11
Кпд, %	59.67	59.59	60.49
Коэффициент усиления, дБ	16.42	16.28	16.84

При последующих измерениях методом активной нагрузки (Load Pull) оценивались выходная мощность, усиление и коэффициент полезного действия стока на частоте 5 ГГц. Входная мощность 15 дБ, напряжение на стоке 28 В. Результаты приведены в табл. 2. Для тестового транзистора без полевого электрода среднее удельное значение максимума выходной мощности — 5.55 Вт/мм, при этом кпд 60 %, коэффициент усиления — 16.5 дБ. Измеренные значения для транзисторов с полевыми электродами отличаются от приведенных не более чем на 10 %, включая разброс параметров по пластине.

Для объяснения слабого влияния полевого электрода на измеренные характеристики были рассчитаны номиналы элементов малосигнальной эквивалентной схемы HEMT [9] без полевого электрода (FP0) и с дискретным полевым электродом (FP1) в режиме максимального усиления (максимальной крутизны). Значения приведены в табл. 3. R_g, R_s, R_d — сопротивления затвора, истока и стока, определяемые из измерений транзистора в пассивном режиме ($V_d = 0$ В, $V_g = 0$ В); C_{gs}, C_{ds} — емкость затвор–исток, сток–исток; C_{dg} — емкость обратной связи, влияет прежде всего на максимальное усиление $G_{\max}$; R_{ds} — параметр, определяющий сопротивление открытого канала.

Из табл. 3 следует, что транзисторы с полевым электродом обладают незначительно большей внутренней крутизной на малом СВЧ сигнале (360 мСм/мм против 350 мСм/мм) и максимальным усилением (16.7 дБ на 10 ГГц), но незначительно меньшей граничной частотой f_t. Добавление полевого электрода, электрически соединенного с истоком, увеличило емкость C_{gs} на 10 %, что подтверждает применимость используемой в разд. 2 упрощенной модели плоского конденсатора для оценки его емкости. В итоге получаем, что емкость C_{dg} на транзисторах с полевым электродом меньше, а емкость C_{ds} больше, что, по нашему мнению, на большом сигнале компенсирует повышение малосигнального усиления. На это указывает и незначительное уменьшение граничной частоты.

5. Заключение

В работе исследованы зависимости максимальных рабочих напряжений и СВЧ параметров AlGaN/GaN HEMT на кремниевой подложке от наличия (отсутствия) и конструкции дополнительного полевого электрода, электрически соединенного с истоком по общей шине. Выявлено, что дополнительный полевой электрод существенно увеличивает напряжение пробоя до деградации. Для рабочих напряжений 50 В и выше его необходимо использовать для создания запаса по надежности. Заметных различий в СВЧ параметрах большого сигнала транзисторов с полевым электродом и без него, как улучшений, так и ухудшений не выявлено. Поэтому для работы на относительно низких рабочих напряжениях стока до 25 В в целях упрощения технологии и уменьшения цены изготовления прибора можно не проводить дополнительные технологические операции по изготовлению полевого электрода.

Финансирование работы

Исследования и разработки выполнены в рамках соглашения с Министерством образования и науки № 075-03-2025-266 от 16.01.2025 г. FSMR-2023-0002. Гетероструктуры изготовлены в Научно-технологическом центре микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук. Изготовление и тестирование транзисторов проведено в НИУ МИЭТ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J.R. Kumar, H.V. Du John, I.V.K. Jebalin, J. Ajayan, A. Delighta, D. Nirmal. Microelectronics J., **140**, 105951 (2023).
[2] Y.-F. Wu, A. Saxler, M. Moore, R.P. Smith, S. Sheppard, P.M. Chavarkar, T. Wisleder, U.K. Mishra, P. Parikh. IEEE Electron Dev. Lett., **25** (3), 117 (2004).
[3] S. Karmalkar; U.K. Mishra. IEEE Trans. Electron Dev., **48** (8), 1515 (2001).
[4] C. Dundar, D. Kara, N. Donmezer. IEEE Trans. Electron Dev., **67** (1), 57 (2020).
[5] V. Kumar, G. Chen, S. Guo, I. Adesida. IEEE Trans. Electron Dev., **53** (6), 1477 (2006).
[6] М.Н. Журавлев, В.И. Егоркин. ФТП, **57** (9), 773 (2023).

Таблица 3. Значения параметров эквивалентной схемы транзистора

Тип транзистора	R_g, Ом	R_s, Ом	R_d, Ом	G, мСм	C_{gs}, пФ	C_{dg}, пФ	C_{ds}, пФ	R_{ds}, Ом	I_{ds}, мА	f_t, ГГц	$G_{\max}$ (10 ГГц), дБ
FP0	3.4	3.8	5.7	87	0.543	0.035	0.08	853	155	25	14.6
FP1	3.4	3.5	5.7	90	0.592	0.021	0.136	746	73	23	16.7

[7] J.L. Lyons, A. Janotti, C.G. Van de Walle. Appl. Phys. Lett., **97**, 152108 (2010).
[8] T. Maeda, T. Narita, S. Yamada, T. Kachi, T. Kimoto, M. Horita, J. Suda. J. Appl. Phys., **129**, 185702 (2021).
[9] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов:* В 2-х кн. 2-е изд. (М., Мир, 1984) кн. 1.

Редактор Г.А. Оганесян

Characterization of AlGaN/GaN high frequency transistors with field-plate electrode on a silicon substrate

M.N. Zhuravlev[1], *V.E. Zemlyakov*[1], *N.V. Guminov*[1], *A.A. Zaitsev*[1], *D.S. Shpakov*[1], *I.V. Makartsev*[1], *K.V. Dudinov*[2], *V.I. Egorkin*[1]

[1] National Research University of Electronic Technology „MIET“,
124498 Moscow, Zelenograd, Russia
[2] JSC „RPC „Istok“ named after Shokin,
141190 Moscow region, Fryazino, Russia

Abstract The electrical breakdown and microwave characteristics of AlGaN/GaN transistors with different field-plate electrodes, electrically connected to the source via a common bus, were studied. It was shown that adding field-effect electrodes increases the breakdown voltage, increases the gain by more than 2 dB in the frequency range up to 15 GHz.