

AlGaN/GaN-СВЧ НЕМТ-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{\max} до 100 ГГц

© В.Г. Мокеров[¶], А.Л. Кузнецов, Ю.В. Федоров, Е.Н. Енюшкина, А.С. Бугаев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, Р.Р. Галиев, Е.Н. Овчаренко, Ю.Н. Свешников*, А.Ф. Цацульников⁺, В.М. Устинов⁺

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

* ЗАО Элма-Малахит-Концерн Энергомера, 124460 Зеленоград, Россия

⁺ Санкт-Петербургский Физико-технологический научно-образовательный центр Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 4 сентября 2008 г. Принята к печати 22 сентября 2008 г.)

Исследованы AlGaN/GaN НЕМТ — (High Electron Mobility Transistor) — транзисторы с секционированными затворами, с различными длинами затворов L_g от 170 нм до 0.5 мкм и с их ширинами $W_g = nW_g^n$ (где W_g^n — ширина секций и n — их количество) от 100 до 1200 мкм. По измеренным S -параметрам определены предельные частоты усиления по току f_t , по мощности f_{\max} и коэффициенты усиления MSG/MAG на частотах 10, 20 и 30–40 ГГц. Исследована зависимость частоты f_t от длины затвора. При $L_g = 170$ нм f_t достигает 48 ГГц. Проанализированы зависимости частоты f_{\max} от размеров затворов и их топологии. С уменьшением L_g и W_g^n f_{\max} растет и при $L_g = 170$ нм и $W_g = 100$ мкм достигает 100 ГГц. Найдены оптимальные значения ширин затворов W_g и выходной мощности базовых транзисторов для различных частот. В разработанной 170 нм-AlGaN/GaN-НЕМТ-технологии сочетаются и высокие частотные характеристики ($f_{\max} = 100$ ГГц) и большие пробивные напряжения (115 В), что делает ее привлекательной для функционирования на частотах до 40 ГГц.

PACS: 73.61.Ey, 84.37.+q, 84.40.Lj, 85.30.-z, 85.30.De, 85.35.-p

1. Введение

В последние годы проявляется возрастающий интерес к сверхвысокочастотным (СВЧ) транзисторам и монолитным интегральным схемам (МИС) на широкозонной гетеросистеме AlGaN/GaN. Большая ширина запрещенной зоны E_g ($E_g = 3.47$ эВ для GaN и 6.2 эВ для AlN [1]) и соответственно большие напряжения пробоя ($U_d^{BD} > 100$ В), высокая слоевая концентрация электронов $n_e > 10^{13}$ см⁻², обусловленная спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией, и высокая скорость электронов делают эту гетеросистему чрезвычайно перспективной для мощных СВЧ-приборов. К настоящему времени наиболее интенсивно исследованы AlGaN/GaN-НЕМТ — (High Electron Mobility Transistor) — транзисторы сантиметрового диапазона. На частоте $f = 4$ ГГц достигнута рекордно высокая удельная выходная мощность $P_{\text{out}} > 32$ Вт/мм [2]. Впечатляющие результаты получены и для транзисторов миллиметрового диапазона. Достигнутые здесь предельные частоты усиления по току f_t и по мощности f_{\max} составляют: $f_t = 163$ ГГц [3] и $f_{\max} = 230$ ГГц [4]. Однако для реализации столь высоких частот, как правило, приходится жертвовать большими пробивными напряжениями. В то же время возможности частотных свойств транзисторов с высокими пробивными напряжениями (выше 100 В) исследованы мало. Недостаточно

исследованы и зависимости частотных характеристик AlGaN/GaN-транзисторов от размеров и топологии секционированных затворов, применяемых в мощных транзисторах, хотя эти данные чрезвычайно важны для разработки оптимальных конструкций мощных транзисторов и МИС на различные частоты.

Настоящая работа посвящена исследованию AlGaN/GaN-СВЧ НЕМТ-транзисторов с длинами затворов L_g от 170 нм до 0.5 мкм, включая исследование зависимости их частотных характеристик от размеров и топологии секционированных затворов, с целью нахождения затворных конструкций, оптимальных для функционирования в различных частотных диапазонах. Также исследуются возможности частотных свойств короткоканальных ($L_g < 200$ нм) AlGaN/GaN-транзисторов с высокими пробивными напряжениями (выше 100 В). Предварительные результаты этих исследований были представлены в [5].

2. Выращивание гетероструктур AlGaN/GaN

Гетероструктуры Al_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN для мощных НЕМТ-транзисторов выращивались на подложках сапфира с ориентацией (0001) методом газофазной эпитаксии путем разложения металлоорганических соединений при пониженном давлении [6]. Температура

[¶] E-mail: vgmokеров@yandex.ru

роста составляла 1030–1070°С. Выращивание слоев гетероструктур осуществлялось в следующей последовательности. Сначала на подложках сапфира формировался зародышевый слой, затем выращивались: нелегированный ($N_{bg} < 10^{15} \text{ см}^{-3}$) буферный слой GaN толщиной 3 мкм, нелегированный слой $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ ($N_{bg} < 10^{16} \text{ см}^{-3}$) толщиной 33 нм. Холловские значения электронной подвижности μ_e и концентрацией n_e составляли: $\mu_e = 1370 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при $T = 300 \text{ К}$ и $4500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при $T = 77.8 \text{ К}$; $n_e = 9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при $T = 300 \text{ К}$ и $1.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при $T = 77.8 \text{ К}$.

3. Технология формирования НЕМТ-транзисторов

Изготовление НЕМТ-транзисторов на выращенных гетероструктурах $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{N}/\text{GaN}$ включало следующие операции [5]: формирование омических контактов $\text{Ti}(20 \text{ нм})/\text{Al}(100 \text{ нм})/\text{Ni}(40 \text{ нм})/\text{Au}(150 \text{ нм})$ и их вжигание при $T = 830^\circ\text{C}$ в течение 30 с; Ag^+ -ионно-лучевое травление меза-областей для межприборной изоляции; пассивация поверхности посредством плазмохимического осаждения слоя Si_3N_4 толщиной 0.1 мкм; электронно-лучевая литография формирования грибообразных затворов с применением трехслойной системы электронорезистов ПММА/Сополимер/ПММА, последующее напыление затворной металлизации $\text{Ni}(40 \text{ нм})/\text{Au}(460 \text{ нм})$ и операция „взрыва“ электронорезистов; формирование электрических межсоединений 1-го уровня; формирование электрических межсоединений 2-го уровня, включая воздушные мостики с гальванически осажденными толстыми (2–4 мкм) слоями металлизации; и наконец, утонение пластины.

Для изучения зависимостей частотных характеристик транзисторов от длины L_g , ширины W_g секционированных затворов и от их топологии, в целях определения оптимальных конструкций мощных транзисторов для функционирования в различных частотных диапазонах был

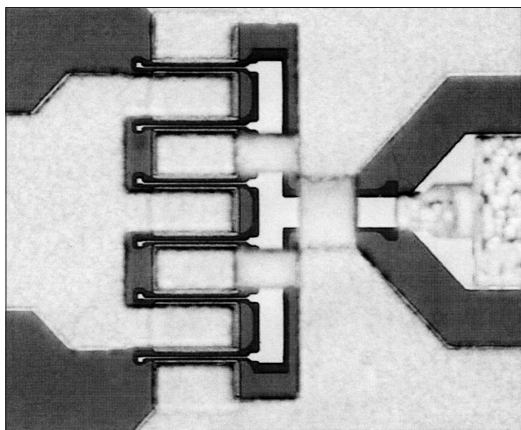


Рис. 1. Фотография секционного НЕМТ-транзистора $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ с длиной затвора $L_g = 0.26 \text{ мкм}$, с шириной $W_g = nW_g^n = 6 \cdot 40 \text{ мкм} = 240 \text{ мкм}$.

разработан специальный исследовательский комплект из различных типов транзисторов с секционированными затворами, отличающихся длиной L_g , суммарной шириной $W_g = nW_g^n$ и топологией затворов, где n — количество затворных секций и W_g^n — их ширины. Этот комплект включал транзисторы с длинами затворов L_g : 170, 220, 260 нм и 0.5 мкм со следующими комбинациями W_g^n и n в выражении $W_g = nW_g^n$: 2×50 , 2×120 , 2×200 , 4×60 , 4×100 , 4×150 , 6×40 , 10×75 и $10 \times 120 \text{ мкм}$. Таким образом, количество секций n в исследуемых транзисторах изменялось от 2-х до 10, размеры секций W_g^n — от 40 до 200 мкм, а полная ширина W_g — от 100 до 1200 мкм. Расстояние между секциями равнялось 22 мкм. На рис. 1 представлена фотография 6-секционного ($n = 6$) транзистора с длиной затвора $L_g = 0.26 \text{ мкм}$ и с ширинами W_g и W_g^n — 240 и 40 мкм соответственно.

4. Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики транзисторов

Выходные вольт-амперные I_d-U_d -характеристики исследуемых транзисторов измерялись зондовым методом непосредственно на рабочих пластинах, до и после пассивации поверхности слоем Si_3N_4 . Установлено, что пассивация приводит к улучшению I_d-U_d -характеристик, включая: уменьшение напряжения насыщения на стоке U_d^{sat} , увеличение тока насыщения стока I_d^{sat} и ослабление „коллапса“ тока стока I_d при больших напряжениях на стоке U_d . В связи с этим в дальнейшем были исследованы только пассивированные транзисторы. Однако проявление эффекта саморазогрева и связанной с ним деградации тока в канале I_d не позволило провести в статическом режиме корректные измерения I_d-U_d -характеристики в достаточно широком диапазоне токов I_d (до 600 мА/мм) и напряжений U_d (до 50 В). Кроме того, наложение эффекта саморазогрева на так называемый „коллапс“ тока I_d , связанный с захватом электронов на глубокие ловушки, затрудняло изучение в статическом режиме роль каждого из них в отдельности. Поэтому измерения I_d-U_d -статических характеристик были ограничены токами $I_d < 300 \text{ мА/мм}$ и напряжениями $U_d < 20 \text{ В}$. В случае предельно малых токов $I_d < 20 \text{ мА/мм}$ (при $U_g < -4 \text{ В}$) диапазон измерений U_d мог быть расширен до напряжений $U_d = U_d^{\text{BD}} = 115 \text{ В}$.

Для уменьшения саморазогрева транзисторов при больших токах I_d и напряжениях U_d была разработана методика импульсных измерений, в которой длительность импульсов τ_{pul} варьировалась от 200 нс до десятков мс при скважности от 15 до 150. Максимальная мощность в импульсе P_{pul} при напряжении $U_d = 50 \text{ В}$ и токе $I_d = 600 \text{ мА/мм}$ достигала рекордно высоких значений для транзисторов на сапфировых подложках 30 Вт/мм. Установлено, что при $\tau_{\text{pul}} > 10-30 \text{ мс}$ и токе $I_d = 600 \text{ мА/мм}$, в результате саморазогрева транзисторы „выгорали“ при напряжении на стоке $U_d > 30 \text{ В}$.

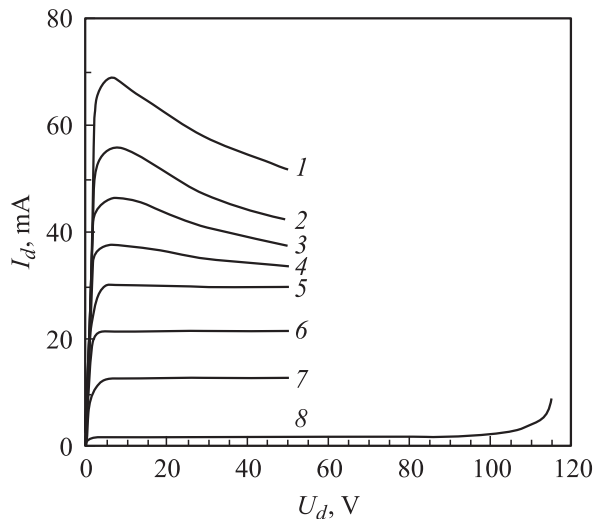


Рис. 2. Импульсные и статические выходные вольт-амперные I_d-U_d -характеристики при различных значениях напряжения U_{gs} для транзистора с длиной затвора $L_g = 0.22$ мкм и шириной затвора $W_g = 2 \times 50$ мкм. Кривые 1–7 — импульсные I_d-U_d -характеристики с длительностью U_d -импульса $\tau_{pul} = 200$ нс, U_{gs} , В: 1 — 0, 2 — -0.5 , 3 — -1.0 , 4 — -1.5 , 5 — -2.0 , 6 — -2.5 , 7 — -3.0 . Кривая 8 — статическая I_d-U_d -характеристика при $U_{gs} = -4.0$ В.

В то же время для напряжений $U_g < -1.5$ В и соответственно $I_d < 350$ мА/мм, для импульсов с $\tau_{pul} = 200$ нс и скважностью 150 саморазогрев почти не проявлялся. Из-за возможностей используемого генератора импульсов диапазон импульсных измерений был ограничен напряжениями до $U_d = 50$ В. На рис. 2 приведены результаты измерений импульсных I_d-U_d -характеристик с $\tau_{pul} = 200$ нс для транзистора с длиной затвора $L_g = 0.26$ мкм и шириной $W_g = 2 \times 50$ мкм (кривые 1–7). Здесь же приведена статическая I_d-U_d -характеристика (кривая 8), полученная в режиме малого тока I_d при U_d до 115 В. Из рис. 2 следует, что максимальная плотность тока I_d^{max} достигает 600 мА/мм, напряжение насыщения на стоке U_d^{sat} равняется 3 В, максимальная крутизна $g_m^{max} = \frac{1}{W_g} \frac{dI_d}{dU_g}$ составляет 240 мС/мм, максимальное напряжение на стоке U_d^{BD} составляет около 115 В.

Из рис. 2 также следует, что заметного „коллапса“ тока I_d в исследуемом диапазоне U_d (до 50 В) не наблюдается. Если в качестве максимального напряжения на стоке U_d^{max} взять значение 60 В, то получаем оценку для удельной выходной мощности P_{out}^* транзистора:

$$P_{out}^* = \frac{(U_d^{max} - U_d^{sat}) I_d^{max}}{8} \cong 4.2 \text{ Вт/мм.} \quad (1)$$

Одновременно необходимо отметить, что, как видно из рис. 2, при напряжениях на затворе $U_{gs} > -1.5$ В и токах $I_d > 350$ мА/мм, даже при импульсных измерениях с $\tau_{pul} = 200$ нс, на I_d-U_d -характеристиках с увеличением напряжения на стоке U_d наблюдался линейный спад тока

насыщения I_d^{sat} , обусловленный саморазогревом транзистора, т. е. повышением температуры приборного канала. Относительное уменьшение максимального тока насыщения $\Delta I_d/I_d$, наблюдаемое при $U_{gs} = 0$ и $U_d = 50$ В, т. е. когда подводимая к транзистору электрическая мощность достигала 3 Вт (30 Вт/мм), составило 27%.

Следует особо отметить превосходное качество межприборной изоляции и соответственно отсутствие токов утечки между транзисторными меза-областями. Плотность тока утечки изоляции менее 0.5 мА/мм при напряженности электрического поля 240 кВ/см. Высокое качество изоляции позволило получить и высокие значения максимальных напряжений транзисторов. В рассматриваемых транзисторах ток затвора $I_g < 1$ мА/мм при $U_{gd} = 60-70$ В и ток стока $I_d < 3$ мА/мм при $U_d > 100$ В ($U_{gs} \leq U_{gs}^{th} = -4$ В).

В результате исследований вольт-фарадных $C_{gs}-U_{gs}$ -характеристик определены пороговое напряжение транзисторов U_{th} и емкость затвор-исток C_{gs} . Пороговое напряжение U_{th} составило -4 В, а зависящая от длины затвора L_g удельная емкость $\frac{C_{gs}}{W_g} = \frac{L_g \epsilon}{d_B}$ (где d_B — толщина гетеробарьерного слоя $Al_{0.27}Ga_{0.73}N$ и ϵ — его диэлектрическая проницаемость) при уменьшении L_g от 0.5 мкм до 170 нм изменялась от 2.2 до 1.5 пФ/мм.

5. СВЧ-характеристики транзисторов

Исследование СВЧ-характеристик разработанных транзисторов проводилось на основе измерений S -параметров непосредственно на рабочих пластинах, с применением высокопрецизионного векторного анализатора в полосе частот от 10 МГц до 67 ГГц. Следует подчеркнуть, что S -параметры измерялись в достаточно широких диапазонах токов I_d от 50 до 250 мА/мм и на-

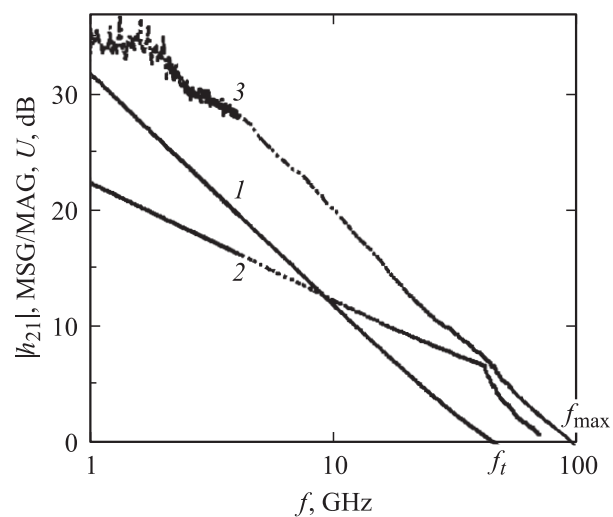


Рис. 3. Частотные зависимости модуля коэффициента передачи по току $|h_{21}|$ (кривая 1), MSG/MAG (кривая 2) и U (кривая 3) для транзистора с $L_g = 170$ нм и $W_g = 2 \times 50 = 100$ мкм, $f_t = 48$ ГГц, $f_{max} = 100$ ГГц.

Значения f_t , f_{max} и MSG/MAG на частотах $F = 10, 20$ и 30 ГГц для транзисторов с длиной затворов L_g от 0.17 до 0.5 мкм и шириной затворов от 100 до 1200 мкм

L_g , мкм	$W_g = nW_g^n$, мкм	f_t , ГГц	f_{max} , ГГц	MSG/MAG $f = 10$ ГГц дБ	MSG/MAG $f = 20$ ГГц дБ	MSG/MAG $f = 30$ ГГц дБ
0.17	2×50	48	100	12.8	10	8.5
	2×50	29	83	12.4	9.8	7.3
0.22	2×120	32	62	12.4	9.8	5.2
	2×200	29	41	12.8	5.8	2.4
0.26	4×60	23	70.3	12.4	9.7	5.4
	4×100	22.2	55	13.0	7.4	4
	4×150	24.3	45	13.2	6.3	3
	6×40	21.2	78.7	12.3	9.5	6
	10×75	19.8	42.4	12.0	5.3	—
	10×120	20.2	33	12.0	3.9	—
0.5	2×50	13.05	29.8	10.2		
	4×60	16.1	46.3	11.7		
	6×40	10.3	35.7	11.0		
	10×75	15.68	32	11.4		
	10×120	15.80	25.2	9.9		

пряжений U_d до 20 В. При этом величина рассеиваемой мощности транзисторов была существенной и варьировалась от 0.5 до 1.7 Вт/мм. По измеренным S -параметрам в указанных диапазонах I_d и U_d рассчитывались частотные характеристики $|h_{21}|$ -модуля коэффициента передачи по току (current gain), а также максимально достижимого/стабильного коэффициента усиления по мощности MAG/MSG (maximum available gain/maximum stable gain) и коэффициента усиления Масона U (unilateral gain). Затем путем стандартных экстраполяций частотных зависимостей $|h_{21}|$, MAG/MSG, U к более высоким частотам, построенных в логарифмическом масштабе в виде прямых с наклоном 20 дБ/дек (10 дБ/дек для MSG), определялись их точки пересечения с осью частот, которые и соответствовали предельным частотам усиления по току f_t и по мощности f_{max} . По зависимости MAG/MSG от частоты f также оценивались коэффициенты усиления K_p на различных частотах. Результаты такого комплекса исследований для короткоканального транзистора с длиной затвора $L_g = 170$ нм и шириной $W_g = 2 \times 50$ мкм представлены на рис. 3. При этом установлено, что с увеличением напряжения U_d до 20 В, тока стока I_d до 170 мА/мм и соответственно рассеиваемой мощности от 0.5 до 1.7 Вт/мм деградации частот f_t и f_{max} не только не происходит, но даже имело место некоторое увеличение частоты f_{max} . Это означает, что „коллапс тока“, связанный с перезарядкой электронных ловушек в исследуемом, достаточно широком диапазоне токов I_d и напряжений U_d , заметно не проявляется. Как видно из рис. 3, для транзистора с длиной затвора $L_g = 170$ нм и шириной $W_g = 2 \times 50$ мкм, при $I_d = 30$ мА/мм и $U_d = 5$ В предельные частоты усиления по току f_t и по мощности

f_{max} равны 48 и 100 ГГц соответственно. В таблице представлены результаты измерений предельных частот усиления f_t и f_{max} и коэффициентов усиления K_p (MSG/MAG) на частотах $f = 10, 20$ и 30 ГГц для транзисторов с различными длинами затворов L_g и их ширинами $W_g = nW_g^n$, отличающихся количеством отдельных секций n и их шириной W_g^n . На примере серии транзисторов с длиной затвора $L_g = 0.26$ мкм была исследована взаимосвязь частоты f_t с ширинами затворов $W_g = nW_g^n$, ширинами секций W_g^n и их количеством n . Как видно из таблицы, какая-либо корреляция здесь

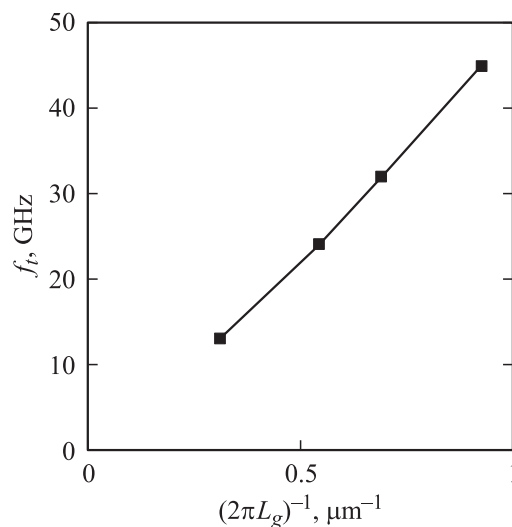


Рис. 4. Зависимость предельной частоты усиления по току f_t от величины, обратной длины затвора L_g (f_t от $(2\pi L_g)^{-1}$) для транзисторов с различной шириной затворов ($W_g = nW_g^n$).

практически отсутствует: при изменении W_g в 12 раз, W_g^n — в 5 раз и n — в 5 раз изменение f_t не превышает 11%. Этот результат согласуется с известным выражением для предельной частоты усиления по току f_t :

$$f_t = \left[2\pi \left(\frac{L_g}{v_e} + C_{gs}(R_s + R_d) \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где R_s и R_d — сопротивления истока и стока, C_{gs} — емкость затвор–исток, v_e — дрейфовая скорость электронов. Полученные данные демонстрируют высокую воспроизводимость технологии изготовления транзисторов, обеспечивая небольшие технологические разбросы по параметрам и транзисторов, и гетероструктур.

Исходя из данных, представленных в таблице, была проанализирована показанная на рис. 4 зависимость предельной частоты усиления f_t от величины, обратной длине затвора $(2\pi L_g)^{-1}$, прямолинейность которой подтверждает отсутствие взаимосвязи f_t с W_g , W_g^n и n . Указанная зависимость также соответствует выражению (2), если в нем пренебречь паразитным вкладом $C_{gs}(R_s + R_d)$ по сравнению с L_g/v_e — временем пролета электронов через приборный канал.

6. Зависимости предельной частоты усиления по мощности f_{\max} и коэффициента усиления K_p от параметров топологии

В отличие от частоты f_t частота f_{\max} зависит не только от длины затвора L_g , но и от его сопротивления R_g , которое для секционированных транзисторов равно $1/3 \cdot R_g^* \cdot W_g/n^2$, т.е. f_{\max} зависит от ширины затворных секций W_g^n , хотя при большом количестве секций может зависеть и от их количества n . Здесь R_g^* — удельное сопротивление затвора.

Прежде чем приступить к анализу измеренных значений предельной частоты усиления по мощности, рассмотрим достаточно простое аналитическое выражение для f_{\max} [7]:

$$f_{\max} = \frac{f_t}{\sqrt{(R_g + R_s + R_i) \left(g_D + g_m \frac{C_{gd}}{C_{gs}} \right)}}. \quad (3)$$

Здесь g_D — выходная проводимость, g_m — крутизна, C_{gd} и C_{gs} — емкости затвор–сток и затвор–исток, $R_i \approx 1/5g_m$ — внутреннее сопротивление затвор–исток, R_s — сопротивление исток–затвор. Так как $f_t \approx g_m/C_{gs}$, выражение (3) можно переписать в виде

$$f_{\max} = \frac{f_t}{\sqrt{(R_g + R_s + R_i) \left(\frac{g_D}{f_t} + C_{gd} \right)}}. \quad (4)$$

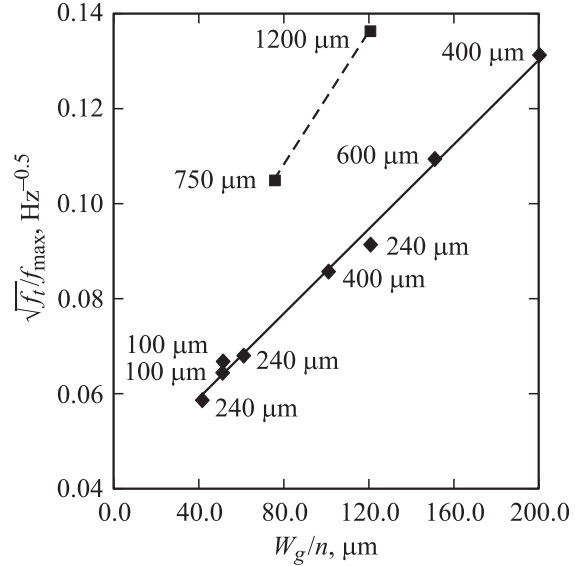


Рис. 5. Зависимость отношения $\sqrt{f_t}/f_{\max}$ для измеренных значений f_t и f_{\max} (см. таблицу) от ширины затворных секций $W_g/n = W_g^n$ для всех исследованных транзисторов с различной длиной L_g и шириной W_g затворов (см. таблицу). В поле графика указана также суммарная ширина затворов.

Переходя от полных (интегральных) значений представленных здесь параметров к их удельным значениям на миллиметр ширины затвора (с индексом *), запишем выражение для f_{\max} как функцию от суммарной ширины затвора W_g :

$$f_{\max}(W_g) = \sqrt{\frac{f_t}{\left(\frac{1}{3} R_g^* \left(\frac{W_g}{n} \right)^2 + R_s^* + R_i^* \right) \left(\frac{g_D^*}{f_t} + C_{gd}^* \right)}}. \quad (5)$$

Напомним, что R_g^* имеет размерность [Ом/мм], а R_s^* и R_i^* имеют размерность [Ом·мм]. Таким образом, f_{\max} при прочих равных условиях является функцией ширины затворной секции W_g/n . Для проверки данного вывода удобно построить зависимость измеренных значений величины $\sqrt{f_t}/f_{\max}$ от ширины затворной секции W_g/n для всех исследованных нами транзисторов. В этом случае на результат почти не будет влиять длина затвора (при условии малости g_D/f_t по сравнению с C_{gd} , что выполняется в нашем случае). Данная зависимость приведена на рис. 5, где также указаны полные ширины затворов W_g . Для ширин затворной секции W_g^n от 40 до 200 мкм, для количества секций от 2 до 6, для длин затвора 0.17–0.26 мкм все измеренные значения укладываются на одну и ту же прямую, отсекающую значение 0.04 на оси ординат при нулевой ширине затворной секции. Это означает, например, что для транзистора с $L_g = 0.17$ мкм, имеющего $f_t = 48$ ГГц, при уменьшении ширины затворной секции W_g^n до нуля гипотетическое предельное значение f_{\max} будет стремиться к $\sqrt{48}/0.04 = 173$ ГГц. Это ограничение

по f_{\max} , как следует из выражения (5), связано с $R \cdot C$ -вкладом от суммарного сопротивления $R_s + R_i$ и емкости обратной связи C_{gd} . Влияние члена g_D/f_t в нашем случае мало, так как зависимость, приведенная на рис. 5, одинакова для транзисторов с различными f_t ($L_g = 0.17-0.26$ мкм). Подчеркнем, что малые значения выходной проводимости g_D подтверждаются данными ВАХ на рис. 2. Таким образом, частота f_{\max} уменьшается при увеличении ширины секций W_g/n для топологии секционированных затворов с количеством секций n от 2 до 6 и не зависит от их количества n и суммарной ширины W_g . Однако в нашем случае эта закономерность не соблюдается для транзисторов с наибольшим количеством секций, т.е. $n = 10$ ($W_g = 750$ и 1200 мкм на рис. 5). Наклон прямой на рис. 5 для таких транзисторов заметно больше, но значение $\sqrt{f_t}/f_{\max}$ при нулевой ширине секции оказывается не намного больше. Из этого следует, что транзисторы с $n = 10$ имеют большее значение удельного сопротивления затвора. Поскольку сами затворы примерно одинаковы для всех значений n , дополнительный вклад в сопротивление здесь, по-видимому, дает достаточно длинная затворная шина, тем более что расстояние между затворными секциями в нашем случае довольно велико — 26 мкм. Такое расстояние было выбрано для ограничения рабочей температуры канала и улучшения теплоотвода.

7. Выбор оптимальной топологии секционированных затворов для различных частот функционирования транзисторов

В процессе разработки мощных транзисторов одной из главных задач является получение большой выходной мощности при сохранении достаточно большого усиления. Это может быть достигнуто за счет увеличения суммарной ширины секционированных затворов W_g . Однако, как следует из рис. 5, для обеспечения приемлемых коэффициентов усиления K_p (т.е. достаточно высоких f_{\max}) длина L_g и ширина затвора W_g не должны превышать некоторых предельных значений L_g^{\max} , W_g^{\max}/n и n . Если задаться минимальным значением коэффициента усиления $K_p > 7$ дБ, что практически оправдано, то получим следующие значения максимальных ширин затворов W_g^{\max} для различных частот. В случае транзисторов с длиной затвора $L_g = 0.26$ мкм, изготовленных по разработанной нами технологии, получаем, что для $f = 10-12$ ГГц $W_g^{\max} = 1200$ мкм, для $f = 20$ ГГц $W_g^{\max} = 720$ мкм. Для функционирования в диапазоне частот $\Delta f = 30-40$ ГГц длина затвора L_g не должна превышать 170 нм, при этом максимальная ширина затворов W_g^{\max} составляет $W_g^{\max} = 6 \times 50 = 300$ мкм. Транзисторы с такими параметрами секционированных затворов следует рассматривать в качестве базовых ячеек для монолитных интегральных схем (МИС) на соответствующие диапазоны частот.

8. Мощностные характеристики базовых AlGaIn/GaN-HEMT-транзисторов

Как следует из выражения (1), удельная выходная мощность P_{out}^* исследуемых транзисторов составляет 4.2 Вт/мм. В соответствии с этим получаем следующие значения выходной мощности $P_{\text{out}}^{\text{bas}}$ для базовых транзисторов на различных частотах. При $L_g = 0.26$ мкм на частотах $f = 10-12$ ГГц выходная мощность $P_{\text{out}}^{\text{bas}} = 4.5$ Вт, на частоте $f = 20$ ГГц — 3 Вт. При $L_g = 170$ нм на частотах $f = 30-40$ ГГц выходная мощность $P_{\text{out}}^{\text{bas}} = 1.26$ Вт. Таким образом, с увеличением рабочей частоты длина L_g , ширина W_g^{\max} затворов и выходная мощность $P_{\text{out}}^{\text{bas}}$ базовых транзисторов должны уменьшаться. Поэтому при проектировании СВЧ МИС на более высоких частотах для обеспечения достаточно большой выходной мощности потребуется большее количество параллельно включенных базовых транзисторов в каждом каскаде.

К изложенным результатам следует добавить, что достоинством разработанной технологии короткоканальных 170 нм-AlGaIn/GaN-HEMT-транзисторов является удачное сочетание достаточно высокой предельной частоты усиления по мощности $f_{\max} = 100$ ГГц с большим пробивным напряжением транзистора $U_d^{\text{BD}} = 115$ В. Это позволяет создавать на их основе высокоэффективные усилители мощности не только сантиметрового, но и более высокочастотного миллиметрового диапазона (до 40 ГГц).

9. Заключение

Исследованы частотные характеристики широкого набора AlGaIn/GaN-HEMT-транзисторов с различными размерами и топологией секционированных затворов. Гетероструктуры $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{N}/\text{GaN}$ выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках сапфира с ориентацией (0001). Электронная подвижность μ_e и концентрация n_e при $T = 300$ К составляли: $\mu_e = 1370$ см²/В·с и $n_e = 9 \cdot 10^{12}$ см⁻². С применением электронной литографии на них изготовлены HEMT-транзисторы с длинами затворов L_g от 170 нм до 0.5 мкм и с ширинами затворов W_g от 100 до 1200 мкм. Максимальная крутизна g_m^{\max} составляла 240 мС/мм, максимальная плотность тока $I_d^{\max} > 600$ мА/мм и пробивные напряжения $U_d^{\text{BD}} = 115-120$ В. В результате исследований S -параметров для всего набора транзисторов определены предельные частоты усиления по току f_t , по мощности f_{\max} и коэффициенты усиления K_p на частотах 10, 20, 30 ГГц. Частота f_t , обратно пропорционально зависящая от длины затворов L_g , при $L_g = 170$ нм достигает значения 48 ГГц. В отличие от f_t частота f_{\max} зависит не только от L_g , но и от размеров затворных секций W_g^n , а при их большом количестве n и от n . При $L_g = 170$ нм

и $W_g = 100$ мкм частота f_{\max} достигает 100 ГГц. В результате исследований частотных зависимостей коэффициента усиления при различных длинах затворов L_g и их ширинах W_g найдены оптимальные значения W_g и выходной мощности базовых транзисторов $P_{\text{out}}^{\text{bas}}$ для различных частот функционирования. В разработанной 170 нм-AlGaN/GaN-HEMT-технологии удачно сочетаются высокие частотные характеристики и большие пробивные напряжения, что делает ее привлекательной для усилителей мощностей на частотах до 40 ГГц.

Список литературы

- [1] Takash Jnour, T. Nakajama, Y. Ando. IEEE Trans. Electron. Dev., **55** (2), 483 (2008).
- [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] M. Higashiwaki, N. Onojima, T. Matsui, T. Minura. *Int. Conf. Nitride Semiconductors* (Bremen, Germany, 2005) Paper We-ED2-4.
- [4] T. Palacios, A. Chakraborty, S. Heikman, S. Keller, S.P. DenBaars, U.K. Mishra. IEEE Electron. Dev. Lett., **27** (1), 15 (2006).
- [5] В.Г. Мокеров, А.А. Кузнецов, Ю.В. Федоров, Е.Н. Енюшкина, А.С. Бугаев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, Р.Р. Галиев, Ю.Н. Свешников, А.Ф. Цацульников, В.М. Устинов. *Тез. докл. 6-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“* (СПб., Россия, 2008) с. 152.
- [6] A.K. Konorev. *Proc. 9th Int. Symp. Nanostructures, Physics and Technol.* (St.Petersburg, Russia, 2001) p. 230.
- [7] G. Dambrine, T. Parenty, S. Bollaert, H. Happy, A. Cappy, J. Mateos, T. Nahri, J.C. Orthoc, M. Trier, P. Bander, P. Landry. *Proc. Conf. 11th Eur. Gallium Arsenide and other Compound Semiconductors Application Symposium, ICM* (Munich, Germany, 2003) p. 473.

Редактор Л.В. Беляков

AlGaN/GaN-HEMTs with breakdown voltage higher than 100 V and maximum oscillation frequency f_{\max} up to 100 GHz

V.G. Mokerov, A.L. Kuznetsov, Yu.V. Fedorov, A.S. Bugaev, A.Yu. Pavlov, E.N. Enushkina, D.L. Gnatjuk, A.V. Zuev, R.R. Galiev, E.N. Ovcharenko, Yu.N. Sveshnikov*, A.F. Zazulnikov⁺, V.M. Ustinov⁺

Institute of UHF Semiconductor Electronics,
Russian Academy of Sciences,
117105 Moscow, Russia

* Elma-Malahit–Concern Energomere,
124460 Zelenograd, Russia

⁺ St. Petersburg Physics and Technology Centre
for Research and Education,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract $N\text{-Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{N}/\text{GaN}$ -HEMTs with the different gate lengths L_g from 170 nm to $0.5\ \mu\text{m}$ and gate widths W_g from 100 to $1200\ \mu\text{m}$ have been investigated. The S -parameters were measured, and the current gain cut-off frequency f_t , the maximum oscillation frequency f_{\max} and the power gain MSG/MAG and Mason's coefficients were investigated in the frequency range from 10 MHz to 67 GHz as a function of gate length and gate width. It was found, that f_t and f_{\max} achieve their maximum values of $f_t = 48$ GHz and $f_{\max} = 100$ GHz at $L_g = 170$ nm and $W_g = 100\ \mu\text{m}$. The optimal values of W_g and output power P_{out} of the basic transistors have been determined for the different frequencies of operation. It was also demonstrated, that the 170 nm-Al_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN-HEMTs-technology combines both the good frequency characteristics and the high breakdown voltages and is very promising for high frequency application — up to 40 GHz.