УДК 321.382.323

С.В. Михайлович, Ю.В. Фёдоров, А.С. Бугаев, Р.Р. Галиев, А.Э. Ячменёв, М.Ю. Щербакова

Построение масштабируемой шумовой модели МНЕМТ на GaAs с L_g от 50 до 250 нм

Разработана управляемая технология создания МНЕМТ на GaAs с L_g до 50 нм, которая позволила разработать методику и построить масштабируемые малосигнальные эквивалентные схемы и шумовые модели МНЕМТ с частотой отсечки тока до 300 ГГц. Приводятся результаты моделирования и сравнение этих результатов с измеренными *S*-параметрами и коэффициентами шумов для транзисторов с шириной Т-образных затворов от 2×30 до 2×80 мкм и длинами от 50 до 250 нм.

Ключевые слова: МНЕМТ, эквивалентная схема, шумовая модель, коэффициент шума.

В настоящее время происходит активное освоение крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона, как для военного, так и для гражданского применения. Постоянно повышаются требования к монолитным интегральным схемам (МИС) в плане увеличения коэффициента усиления, уменьшения коэффициента шума, увеличения быстродействия и т.п. Разработка МИС КВЧ диапазона связана с решением комплекса задач как технологических, так и связанных с проектированием. Важную роль при решении этих задач играет малосигнальная эквивалентная схема HEMT (High Electron Mobility Transistor). Такая модель необходима для анализа частотных и шумовых параметров при проектировании МИС КВЧ диапазона [1], а также для характеризации технологических процессов при изготовлении устройства. Существующие методы экстракции параметров эквивалентной схемы обладают рядом недостатков. Так, например, оптимизационные методы требуют первоначального задания ключевых параметров для корректного определения значений параметров схемы, что представляет известную трудность. Аналитический метод, предложенный *Dambrin* [2] и улучшенный *Berroth* [3], полагается на дополнительные измерения в т.н. «холодном» режиме, но тоже не гарантирует корректности результата. Другие аналитические методы, например, метод наименьших квадратов [4], отличаются сложностью построения систем уравнений при каждом изменении эквивалентной схемы. Все эти методы, в том числе и комбинированный [5], направлены на построение модели по данным измерений *S*-параметров транзистора с одной шириной затвора. Кроме того, данные о систематических исследованиях малосигнальных и шумовых моделей метаморфных гетероструктурных полевых транзисторов (МНЕМТ) с длиной затворов менее 0,1 мкм в литературе практически отсутствуют.

В нашей работе предлагается метод и приводятся результаты построения масштабируемой малосигнальной модели МНЕМТ в диапазоне длин затворов от 50 до 250 нм и предельной частотой передачи по току (F_t) до 300 ГГц, основанный на оптимизации связанных между собой параметров эквивалентных схем транзисторов с разной шириной и длиной затворов без использования интерполяции параметров.

	n^+ $In_{0,42}Ga_{0,58}As$	150 Å	контактный слой
δ-Si →	*i*- $In_{0,42}Al_{0,58}As$	120 Å	барьер
	i- $In_{0,42}Al_{0,58}As$	30 Å	спейсер
	i- $In_{0,42}Ga_{0,58}As$	180 Å	канал
	i- $In_{0,42}Al_{0,58}As$	0,4 мкм	буфер 2
	AlGaAs/InAlAs	260 Å	сверхрешётка
	i- $In_xAl_{(1-x)}As$	1 мкм	буфер 1
	GaAs (100)	0,5 мм	подложка

Концентрация n^+Si: $6\cdot10^{18}$ см$^{-3}$;
концентрация δ-Si: $7\cdot10^{12}$ см$^{-2}$

Рис. 1. Схема гетероструктуры образца №226 (1δ-МНЕМТ, Ø50 мм)

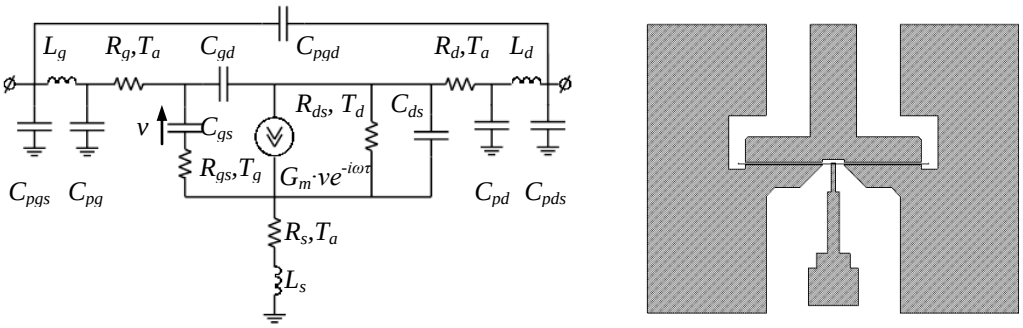
Технология создания и процедура измерения транзисторов. Транзисторы для разработки модели были изготовлены по технологии ИСВЧПЭ РАН на гетероструктуре типа МНЕМТ (образец №226) с односторонним δ-легированием, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs диаметром 50 мм с ориентацией (100). Схемы слоёв и основные параметры гетероструктуры приведены на рис. 1.

Для изучения зависимостей частотных и шумовых характеристик от ширины (W_g) и длины (L_g) затворов и для построения масштабируемых малосигнальных эквивалентных схем и шумовых мо-

делей использовались наборы транзисторов с различной длиной грибообразных затворов в диапазоне от 50 до 250 нм. Каждый набор состоит из четырёх транзисторов (рис. 2б) с разной шириной затворов: 2×30, 2×40, 2×60 и 2×80 мкм.

S-параметры транзисторов измерялись непосредственно на пластине при помощи векторного анализатора Agilent E8361A в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц. Коэффициент шума ($К_ш$) измерялся на установке Agilent N8975A в диапазоне 0,4 – 26 ГГц в 50-омном тракте.

Построение масштабируемой шумовой модели HEMT. Для расчетов использовалась малосигнальная эквивалентная схема (рис. 2а), также являющаяся шумовой моделью Поспешальского [6]. Элементы эквивалентной схемы можно разделить на внутренние и внешние [2]. К внутренним элементам относятся: G_m, τ, C_{gs},C_{ds}, C_{gd}, R_{gs} и R_{ds}, величины которых зависят от выбора рабочей точки. При построении моделей полагалось, что G_m, C_{gs}, C_{ds} и C_{gd} прямо пропорциональны, а R_{gs} и R_{ds} обратно пропорциональны W_g. К внешним элементам относятся: R_s, R_d, R_g, L_g, L_d, L_s, C_{pg}, C_{pd}, C_{pgs}, C_{pds} и C_{pgd}. Считалось, что эти элементы не зависят от выбора рабочей точки и являются паразитными, причём R_s и R_d обратно пропорциональны W_g, а R_g состоит из двух частей, первая часть не зависит, а вторая пропорциональна W_g.



а *б*

Рис. 2. Малосигнальная эквивалентная схема HEMT – *а*; *б* – топология транзистора

Выражения, описывающие внешние крутизну g_m и выходную проводимость g_{ds}, для данной эквивалентной схемы, выглядят следующим образом:

$$g_m = \frac{G_m}{1+G_m R_s + G_{ds}\ R_s + R_d}\ ,\ g_{ds} = \frac{G_{ds}}{1+G_m R_s + G_{ds}\ R_s + R_d}\ , \qquad (1)$$

где $G_{ds} = \dfrac{1}{R_{ds}}$.

Для построения модели использовались данные измерений *S*-параметров набора транзисторов с разной W_g. Зависимые от ширины параметры связывались между собой через удельные значения (на единицу W_g). Значения параметров определялись при помощи оптимизации симплекс-методом, минимизирующим разницу *S*-параметров, *Y*-параметров и $G_{\max}$ для эквивалентных схем транзисторов и их измеренных значений одновременно для всего набора во всём частотном диапазоне измерений (0,1–67 ГГц). Поскольку при оптимизации получаемые значения оптимизируемых величин зависели от начальных значений, то на их диапазоны изменений был наложен ряд ограничений. Сопротивления R_s и R_d описывают сопротивления омических контактов и сопротивление канала, поэтому их значения выбирались между сопротивлением омических контактов и суммой сопротивлений омических контактов и полупроводникового резистора между ними. Значение внешней крутизны g_m оценивалось из частотно-независимой реальной части Y_{21}. Из известных границ изменения R_s по формуле (1), полагая для простоты $G_{ds} = 0$, оценивался диапазон изменений внутренней крутизны G_m. Полученные результаты свидетельствуют, что этих ограничений достаточно для адекватного определения оптимизируемых величин.

Для более точного согласования с результатами измерений $K_ш$ эквивалентные шумовые температуры T_a и T_g принимались равными комнатной температуре (условия измерения), а T_d подбиралось для наилучшего согласования расчётов с измерениями в диапазоне значений 1–10 тысяч К. Эту температуру, в основном, связывают с флуктуациями дрейфовой скорости электронов в канале транзистора [6, 7].

Оптимизация параметров масштабируемой линейной шумовой модели транзистора производилась в среде AWR Microwave Office во всём частотном диапазоне измерений одновременно для всех ширин затворов транзисторов в одном наборе. После этого из эквивалентной схемы удалялись внешние («паразитные») элементы, то есть была произведена процедура де-эмбеддинга для дальнейшего использования внутренней схемы транзистора при проектировании МИС КВЧ-диапазона.

Результаты измерений и их обсуждение. Параметры моделей для шести наборов транзисторов представлены в таблице. Из сравнения *S*-параметров в диапазоне частот 0,1–67 ГГц (рис. 3, *а*) видно, что результаты расчётов достаточно хорошо согласуются с измерениями для всех значений W_g. Шумовая модель также хорошо согласуется с измерениями на частотах более 10 ГГц, однако в области низких частот наблюдается возрастание $K_ш$ (рис. 3, *б*), связываемое нами с фликкер-шумом $1/f$ [8], не учитываемым в модели Поспешальского [6]. Видно, что в случае длинных (250 нм) затворов наблюдается возрастание $K_ш$ с частотой, тогда как для коротких (порядка 50 нм) затворов $K_ш$ практически постоянен, что, очевидно, позволяет использовать такие транзисторы для разработки МИС с рабочими частотами до 60 ГГц и выше.

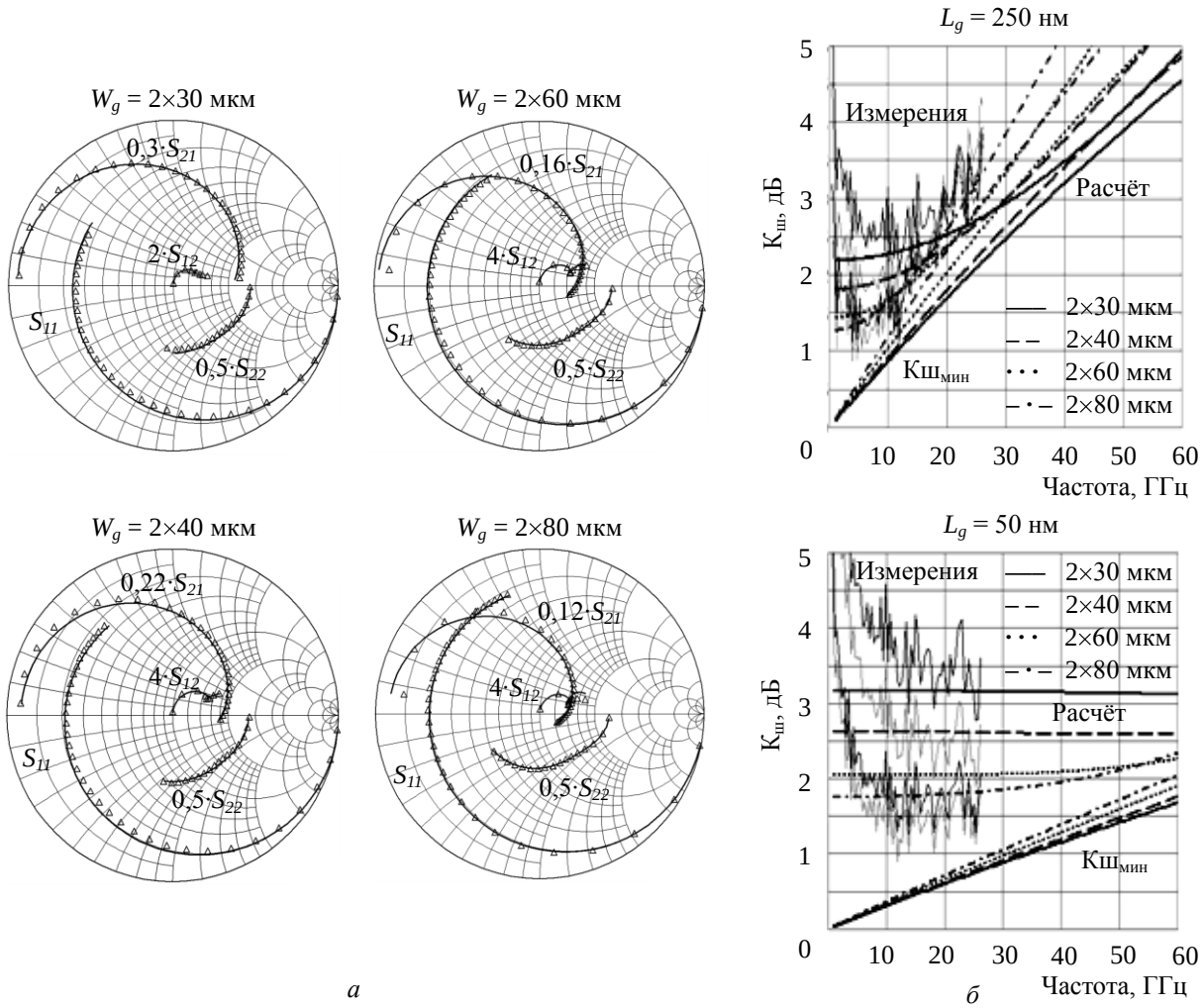


Рис. 3. *а* – частотные зависимости *S*-параметров набора транзисторов МНЕМТ в диапазоне 0,1–67 ГГц при V_d = 1,5 В, V_g = –0,3 В (— – рассчитанные по модели; Δ – измеренные значения); *б* – измеренные и расчётные частотные зависимости $K_ш$ в 50-омном включении

На рис. 4 представлены полученные зависимости F_t и F_{max} внутренних транзисторов для разных L_g, которые достигают 300 и 700 ГГц соответственно до пассивации (200 и 500 ГГц после). Там же для сравнения показаны предельные значения F_t и F_{max} для PHEMT, изготовленных по такой же технологии [9]. Заметим, что для МНЕМТ отношение $F_{max}/F_t > 2{,}5$ даже после пассивации остаётся практически неизменным с уменьшением L_g, в то время как для PHEMT это отношение уменьшается до 1,3 (при L_g = 50 нм), по видимому, в результате короткоканальных эффектов, поскольку PHEMT гетероструктура толще МНЕМТ.

Таблица 1

Параметры масштабируемой шумовой модели МНЕМТ от заданной *Lg*

Параметр		До пассивации			После пассивации		
		250 нм	150 нм	50 нм	250 нм	150 нм	50 нм
Внутренние	G_m, См/мм	0,65	0,75	0,70	0,60	0,64	0,75
	R_{ds}, Ом·мм	79	58	23	117	105	18
	τ, пс	0,98	0,92	0,42	0,66	0,60	0,34
	C_{gs}, пФ/мм	1,62	1,38	0,37	1,50	1,20	0,60
	C_{gd}, пФ/мм	0,048	0,042	0,034	0,073	0,077	0,052
	C_{ds}, пФ/мм	0,23	0,20	0,50	0,27	0,20	0,36
	R_{gs}, Ом·мм	0,45	0,20	0,084	0,39	0,20	0,017
	F_c, ГГц	64	87	301	64	85	200
Внешние	R_g, Ом	0,89	3,77	1,24	0,23	2,16	1,39
	R_g, Ом/мм	25,82	0,0028	0,0413	30,36	17,04	26,67
	R_s, Ом·мм	0,23	0,48	0,65	0,31	0,34	0,51
	R_d, Ом·мм	0,15	0,45	0,81	0,41	0,99	0,94
	L_g, нГ	0,092	0,093	0,093	0,100	0,094	0,091
	L_d, нГ	0,056	0,065	0,050	0,079	0,065	0,052
	L_s, нГ	0,0080	0,0099	0,0074	0,0100	0,0100	0,0100
	C_{pg}, пФ/мм	0,069	0,084	0,152	0,114	0,028	0,055
	C_{pd}, пФ/мм	0,027	0,151	0,067	0,010	0,133	0,097
	C_{pgd}, пФ	0,0028	0,0030	0,0027	0,0014	0,0025	0,0021
	C_{pgs}, пФ	0,0090	0,0047	0,0111	0,0092	0,0082	0,0099
	C_{pds}, пФ	0,0126	0,0091	0,0094	0,0152	0,0096	0,0097

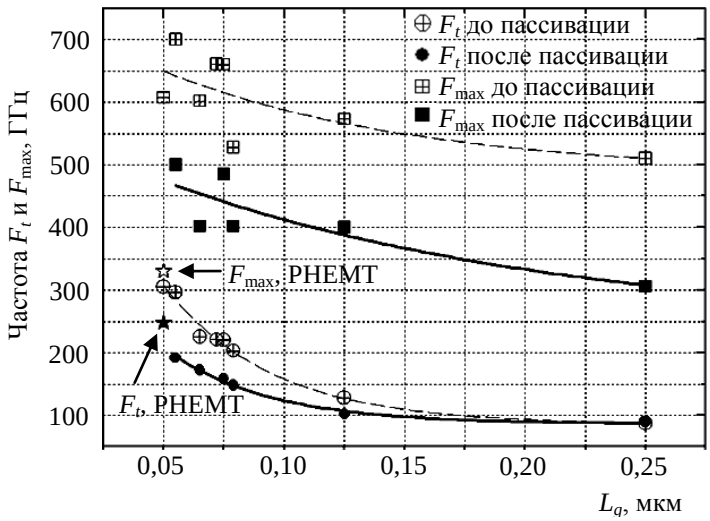


Рис. 4. Зависимость F_t и F_{max} от L_g до и после пассивации

Заключение. Разработанная методика создания масштабируемых малосигнальных и шумовых моделей транзисторов была успешно опробована для НЕМТ на основе метаморфных гетероструктур, изготовленных по отечественной технологии впервые в России.

Создание таких моделей в широком диапазоне длин затворов позволяет определить оптимальные параметры МНЕМТ для различных рабочих частот при проектировании МИС КВЧ диапазона.

Представленные результаты получены в НИР, выполняемой ИСВЧПЭ РАН по государственному контракту с Минобрнауки России № 16.426.11.0046 от 12 сентября 2011 г.

Литература

1. Монолитные интегральные схемы малошумящих усилителей КВЧ-диапазона на GaAs pHEMT-гетероструктурах / Д.Л. Гнатюк, Ю.В. Федоров, Г.Б. Галиев, Р.Р. Галиев, М.Ю. Щербакова // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 1, – С. 49–55.

2. Dambrine G. A New Method for Determining the FET Small-Signal Equivalent Circuit / G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore, E. Playez // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1988. – Vol. 36, № 7. – P. 1151–1159.

3. Berroth M. Broad-band determination of the FET small-signal equivalent circuit / M. Berroth, R. Bosch, B. Smith // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1990. – Vol. 38, № 7. – P. 891-895.

4. Ban Leong Ooi Analytical Extraction of Extrinsic and Intrinsic FET Parameters / Ban Leong Ooi, Zheng Zhong, Mook-Seng Leong // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 2009. – Vol. 57, № 2. – P. 254–261.

5. Коколов А.А. Методика построения малосигнальной модели СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов / А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 153–156.

6. Pospieszalski M.W. Modeling of noise parameters of MESFETs and MODFETs and their frequency and temperature dependence // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1989. – Vol. 37, № 9. – P. 1340–1350.

7. Whiteside C.F. Velocity fluctuation noise measurements on AlGaAs-GaAs interface / C.F. Whiteside, G. Bosman, H. Morkoc // IEEE Trans. Electron Devices. – 1987. – Vol. ED-34. – P. 2530–2533.

8. Жигальский Г.П. Шум вида 1/f и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках // Успехи физических наук. – 1997. – Том. 167, № 6. – С. 623–648.

9. Метод построения масштабируемой шумовой малосигнальной эквивалентной схемы гетероструктурного полевого транзистора миллиметрового диапазона длин волн / С.В. Михайлович, Ю.В. Фёдоров, Р.Р. Галиев, М.Ю. Щербакова // «INTERMATIC–2011» / Матер. Междунар. НТК. Москва, 13–17 ноября 2011 г. – М.: МГТУ МИРЭА-РАН, 2011. – Ч. 2. – С. 182–185.

Михайлович Сергей Викторович
Аспирант каф. микросистемная техника МИРЭА, г. Москва
Эл. почта: sergey_iuhfse@mail.ru

Фёдоров Юрий Владимирович
Зав. лаб. Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва
Эл. почта: yuraf2002@mail.ru
Тел.: +7 (499) 123-74-66

Бугаев Александр Сергеевич
Зав. лаб. ИСВЧПЭ РАН, г. Москва
Тел.: +7 (499) 123-74-66

Галиев Ринат Радифович
Мл. науч. сотрудник ИСВЧПЭ РАН, г. Москва
Эл. почта: rgaliev@isvch.ru
Тел.: +7 (499) 123-74-66

Ячменёв Александр Эдуардович
Мл. науч. сотрудник ИСВЧПЭ РАН, г. Москва

Щербакова Марина Юрьевна
Науч. сотрудник ИСВЧПЭ РАН, г. Москва

Mikhaylovich S.V., Fedorov Yu.V., Bugaev A.S., Galiev R.R., Yachmenev A.E., Scherbakova M.Yu.

On the making of scalable noise model of GaAs MHEMT with Lg of 50 to 250 nm

The precise technology of 50 nm GaAs MHEMT has been developed along with the method for making of scalable small-signal equivalent circuits and noise models of MHEMT with Ft up to 300 GHz. The simulation results are given in comparison with S-parameters and noise figure measurements for T-gate widths of 2x30 up to 2x80 um and lengths of 50 to 250 nm.

Keywords: MHEMT, small-signal model, noise model, noise figure