

УДК 621.382.323

Ю.В. Федоров, М.Ю. Щербакова, Д.Л. Гнатюк, Н.Г. Яременко, В.А. Страхов

НЕМТ на гетероструктурах

$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$

с предельной частотой усиления по мощности до 323 ГГц

Разработана технология молекулярно-лучевой эпитаксии изоморфных гетероструктур $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ на подложках InP с подвижностью $\mu_{\text{H}}=10640 \text{ см}^2/\text{Вс}$ и концентрацией $n_{\text{H}}=3,28 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ двумерного электронного газа при $T=300 \text{ К}$. На них с помощью электронно-лучевой литографии были изготовлены транзисторы с двумерным электронным газом (НЕМТ) с длиной затвора $L_g=180 \text{ нм}$ и двухсекционной топологией затворов с шириной $W_g=2 \times 30, 2 \times 40, 2 \times 60$ и $2 \times 80 \text{ мкм}$. Крутизна транзисторов составляла 1000 См/мм , а максимальная плотность тока стока $I_d=800 \text{ мА/мм}$. Исследованы частотные зависимости S -параметров транзисторов в диапазоне частот $0,01\text{--}67 \text{ ГГц}$ и определены предельные частоты усиления по току F_t и по мощности F_{max} в зависимости от W_g . Приводятся параметры линейных моделей НЕМТ с различными величинами W_g , определены параметры модели «внутреннего» транзистора. Установлено, что для «внутреннего» транзистора предельные частоты F_t и F_{max} максимальны при $W_g=2 \times 30 \text{ мкм}$ и достигают 150 и 323 ГГц соответственно.

Полученные параметры изоморфных гетероструктур и НЕМТ на подложках InP соответствуют мировому уровню для длины затвора 180 нм . В России подобные результаты получены впервые.

Ключевые слова: НЕМТ, InP, изоморфные гетероструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Введение

В последние годы при создании СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) все возрастающий интерес проявляется к НЕМТ-технологии на основе наногетероструктур $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ на подложках InP. С применением этой новейшей технологии разработаны самые быстродействующие трехэлектродные твердотельные приборы. Она рассматривается как наиболее перспективная для СВЧ-наноэлектроники, ориентированной на создание самых высокоскоростных и широкополосных СВЧ-приборов и МИС мм- и суб-мм-диапазонов для систем связи, радиолокации, радиоастрономии, радиометрии, автомобильной электроники, электронных средств вооружения и др. [1]. Преимущества НЕМТ-наногетероструктур $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}/\text{InP}$ обусловлены рекордно высокими значениями электронной подвижности ($\mu_e > 10000 \text{ см}^2/\text{Вс}$) и дрейфовой скорости ($v_{\text{эл}}^D=3 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$) электронов, рекордно высокими значениями концентрации двумерного электронного газа (ДЭГ) $n_{2D}=(3\text{--}5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и низкими паразитными сопротивлениями истока R_S и стока R_d .

Целью данной работы являлось получение гетероструктур $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}/\text{InP}$ с улучшенными транспортными характеристиками 2ДЭГ (μ_e), а также создание технологии изготовления НЕМТ на InP современного уровня и исследование их СВЧ-параметров. Учитывая отсутствие в литературе необходимых сведений по зависимостям предельных частот усиления по мощности F_{max} и по току F_t от топологии транзисторов, мы также провели исследование этих зависимостей.

Молекулярная эпитаксия гетероструктур $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}/\text{InP}$

Изоморфные НЕМТ гетероструктуры $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}/\text{InP}$ выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на установке RIBER-32P. Особое внимание было уделено предостовой подготовке подложек при их нагревании в потоке As $6 \times 10^{-6} \text{ Торр}$. Было установлено, что удаление окислов происходило в диапазоне температур $350\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$, что сопровождалось появлением на дифракционной картине рефлексов кристаллической структуры. В дальнейшем дифракционная картина не изменялась при охлаждении или нагревании пластины в широком диапазоне температур. Реконструкция структуры поверхности с (2×4) в (4×2) , наблюдалась при повышении температуры до $560 \text{ }^\circ\text{C}$, что хорошо согласуется с литературными данными [2]. После этого температура подложки уменьшалась до $490 \text{ }^\circ\text{C}$ и производился рост изоморфной НЕМТ-гетероструктуры $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$. Калибровка молекулярных потоков In, Ga и Al для получения необходимого состава производилась с помощью ионизационного манометра, помещаемого на место выращиваемого образца.

Исследование спектров фотолюминесценции НЕМТ гетероструктур

$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$

Для определения точного состава выращенных слоев $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ в НЕМТ-гетероструктурах необходимо знать зависимость ширины зоны E_g данных соединений от их состава.

Соединение $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Ширина запрещенной зоны $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, по литературным данным, составляет 810 мэВ при $T = 4$ К [3] и 806 мэВ при $T = 77$ К [4]. Для количественной оценки отклонения от стехиометрии канала в выращенных гетероструктурах при обработке спектров ФЛ можно воспользоваться следующей формулой [5]:

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) = 1,508 - 1,582x + 0,485x^2, \quad (1)$$

где x – доля In в соединении. При $x = 0,53$ расчетная величина $E_g = 806$ мэВ. Однако, следует иметь в виду характерное смещение пика фотолюминесценции (ФЛ) из-за особенности рекомбинации электронов и дырок в легированных гетероструктурах, зависящее от ширины канала $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ и плотности электронов двумерного электронного газа [6] (эффект Бурнштейна–Мотта).

Соединение $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$. Данные о ширине зоны $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, приведенные в литературе, противоречивы: $E_g(\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}) = 1,560$ эВ при $T = 4$ К [3], $E_g = 1,543$ эВ при $T = 12$ К [4], $E_g = 1,508$ эВ при $T = 4$ К [7].

Рассчитать зависимость ширины зоны барьера $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ от состава при $T = 77$ К можно, если известна ширины зоны при некотором составе $x = x_0$. Тогда для расчета следует воспользоваться формулой [4]

$$E_g(\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}) = a + b(1 - x) - cx(1 - x), \quad (2)$$

где $a = E_g(\text{InAs}) = 0,410$ эВ; $b = E_g(\text{AlAs}) - E_g(\text{InAs}) = 2,692$ эВ; величина c определяется из (1) при $x = x_0$.

Оценить ширину зоны $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ при $x=0,52$ можно следующим образом. Из литературы известно, что для ненапряженной квантовой ямы $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ разница ширин зон барьера и ямы ΔE_g составляет: [4] – 730 мэВ ($T = 12$ К), [8] – 730 мэВ ($T = 300$ К), [3] – 750 мэВ ($T = 4$ К), [7] – 695 мэВ ($T = 4$ К), т.е. данные противоречивы. Наш анализ показывает, что, вероятнее, $\Delta E_g = 700$ мэВ ($T = 4$ К), при $T = 77$ К величина ΔE_g практически не изменится.

Тогда $E_g(\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}) = E_g(\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}) + \Delta E_g = 0,806 + 0,700 = 1,506$, величина $c = 0,786$ и, следовательно, формула (2) для зависимости ширины зоны $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ от состава при $T = 77$ К принимает вид

$$E_g(\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}) = 0,410 + 2,692(1 - x) - 0,786x(1 - x). \quad (3)$$

Анализ спектров ФЛ выращенных образцов. Измерения спектров проводились в различных точках пластины для определения разброса состава слоев гетероструктуры (рис. 1).

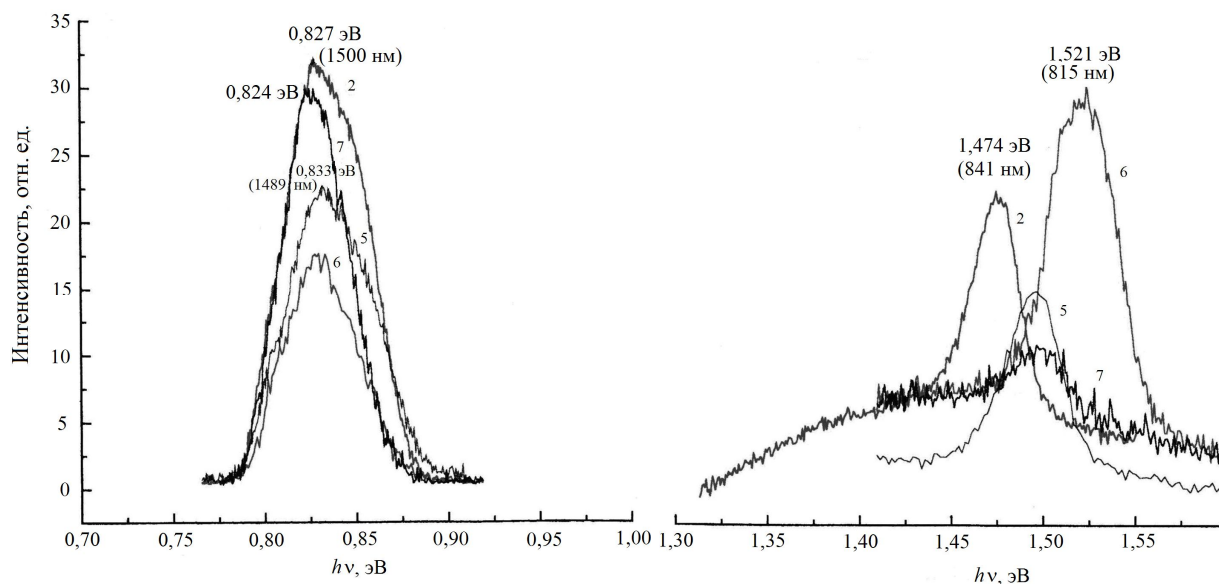


Рис. 1. Спектры ФЛ гетероструктуры $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$

Канал $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ дает пик ФЛ в диапазоне 824–833 мэВ. Поправка на сдвиг Бурнштейна–Мотта учитывалась следующим образом. Толщина слоя $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ (40 нм) в наших образцах точно соответствовала параметрам структур работы [6], для которых был измерен сдвиг Бурнштейна–Мотта в зависимости от концентрации 2ДЭГ: 14 мэВ при $n_{2\text{ДЭГ}} = 2,7 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 15 мэВ при $n_{2\text{ДЭГ}} = 2,8 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и 34 мэВ при $n_{2\text{ДЭГ}} = 4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Поэтому можно было произвести оценку такого сдвига линейной экстраполяцией к нашим величинам концентрации 2ДЭГ ($3,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$). В результате была получена следующая величина: $\delta E = 22$ мэВ. Учитывая данную поправку, получим $E_g = 802\text{--}811$ мэВ, причем средняя величина $E_{g \text{ ср}} = 806$ мэВ. Это соответствует значению E_g для $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ стехиометрического состава. Разброс E_g по пластине не превышает $\pm 0,5\%$, что вполне допустимо.

Буферный слой $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ дает пик ФЛ в диапазоне от 1,466 эВ до 1,521 эВ в различных точках образца. Расчет по формуле (3) показывает, что это соответствует вариации мольной доли InAs от 0,515 (1,52 эВ) до 0,535 (1,466 эВ) с центром тяжести в области величины $x_{\text{In}} = 0,53$ (должно быть 0,52). Такое нарушение стехиометрического состава слоев InAlAs (от +3% до –1% по величине x_{In}) представляется вполне приемлемым, поскольку допускаются вариации содержания InAs в данном слое $\pm 6\%$ без заметного изменения подвижности электронов 2ДЭГ [8].

Таким образом, анализ спектров ФЛ изготовленной НЕМТ-гетероструктуры показал, что все эпитаксиальные слои являлись в достаточной степени стехиометрическими, вследствие чего в дальнейшем были получены высокие параметры двумерного электронного газа.

Измерения Холловских параметров

Измерения Холловских параметров при 300 и 77 К производились с целью исследования зависимости качества гетероструктур от режимов роста. Для получения наилучших электрофизических параметров 2ДЭГ были оптимизированы как конструкция гетероструктур (толщины слоев, уровень δ -легирования кремнием), так и режимы их выращивания (температуры роста и соотношение потоков элементов V и III групп). Поперечное сечение оптимизированной приборной НЕМТ-гетероструктуры показано на рис. 2, а ее электрофизические параметры приведены в табл. 1. Там же для сравнения приведены аналогичные параметры, полученные в работе [9], которые являются наилучшими опубликованными параметрами НЕМТ-гетероструктур на подложках InP из доступных литературных источников.

Таблица 1
Электрофизические параметры гетероструктур $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$

№ п/п	Т-ра отжига, °С	Т-ра роста, °С	Толщина канала, d_c , нм	Холловские параметры гетероструктур			
				300 К		77 К	
				Концентрация N_e , 10^{12} см^{-2}	Подвижность μ_e , $\text{см}^2/\text{Вс}$	Концентрация N_e , 10^{12} см^{-2}	Подвижность μ_e , $\text{см}^2/\text{Вс}$
1410	540	490	40	3,28	10640	3,2	38000
Лит-ра [9]	–	500	40	3,3	10657	3,3	39000

Контактный слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, 20 нм, $N_{\text{Si}} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$
Барьерный слой $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, 23 нм, нелегированный
Донорный слой $\delta\text{-Si}$: $N_{\text{Si}} = 7 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$
Спейсер-слой $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, 4 нм, нелегированный
Канал $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, 36 нм, нелегированный
Буферный слой $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, 500 нм, нелегированный
Подложка InP (100), полуизолирующая

Рис. 2. Параметры слоев оптимизированной гетероструктуры

Изготовление короткоканальных InP НЕМТ

Формирование $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$ НЕМТ осуществлялось посредством следующих технологических операций:

- межприборная изоляция: травление мезаструктур в $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:2:50);
- омические контакты: Ni/Ge/Au (10/20/350 нм), вжигание при $T = 280$ °С;
- электронно-лучевая литография затворов с использованием трехслойной системы резистов РММА950/Сopolimer/РММА950;
- «подгонка» токов затворов путем травления подзатворной области в селективном травителе на основе янтарной кислоты;
- металлизация затворов: Ti/Pd/Au (70/40/400 нм);
- пассивация транзисторов: плазмохимическое осаждение диэлектрических слоев – Si_3N_4 .

Электронно-лучевая литография затворов в данной работе производилась на модернизированной установке ЕВМF-2 (Cambridge Instruments) с CeB_x монокристаллическим прямонакальным катодом при ускоряющем напряжении 38 кВ по тщательно отработанной технологии, что позволило изготовить затворы с длиной $L_g = 180$ нм, площадь сечения затвора $0,5$ мкм².

С целью исследования зависимости СВЧ-параметров транзисторов от топологии на одной пластине был изготовлен набор транзисторов со следующей шириной затворов: $W_g = 2 \times 30, 2 \times 40, 2 \times 60$ и 2×80 мкм.

Статические характеристики InP НЕМТ

Типичные выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) $I_d(U_d)$ приборов представлены на рис. 3. Из них были определены основные параметры транзисторов. По зависимости тока затвора I_g от напряжения сток-затвор U_{dg} было определено напряжение пробоя затвор-сток U_{dg}^{BD} (при $I_g = 1$ мА/мм), которое находилось в пределах от 2 до 3 В. Полученные параметры суммированы в табл. 2. Измерения $C-V$ характеристики затворов

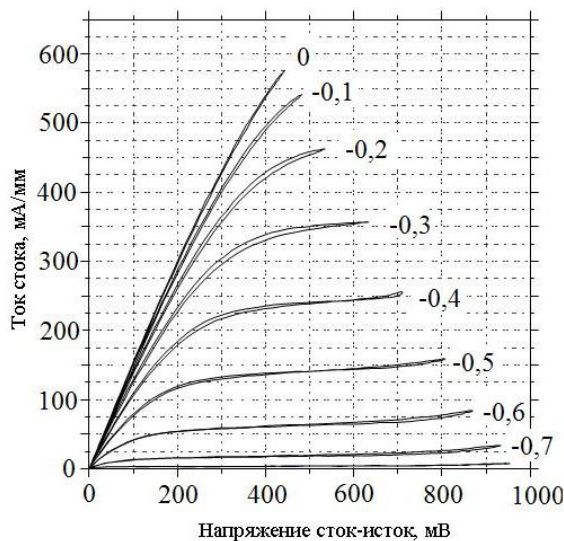


Рис. 3. ВАХ InP НЕМТ транзистора

показали, что значение эффективной удельной ёмкости затвора составляет в среднем $C_{gs} = 1,5$ пФ/мм (при $U_{dg} = 0$).

Представленные значения I_d^{sat} (при $U_g = 0$) и G_m^{max} соответствуют литературным данным для InP НЕМТ на изоморфных гетероструктурах.

Таблица 2
Статические параметры изготовленных InP НЕМТ транзисторов

I_d^{sat} (при $U_g=0$), мА/мм	750–800
U_d^{sat} , В	0,2–0,5
U_g^{th} , В	–0,8 ... –0,9
U_{ds}^{BD} , В	2–3
G_m^{max} , См/мм	>1000
G_d , См/мм	<100
C_{gs} (при $U_{ds}=0$), пФ/мм	1,5

СВЧ характеристики InP НЕМТ

Для исследования СВЧ характеристик изготовленных транзисторов были измерены непосредственно на пластине их малосигнальные S -параметры в диапазоне частот 0,01–67 ГГц с помощью векторного анализа E-8361A фирмы Agilent Technology. Далее рассчитывались частотные зависимости H_{21} , MSG/MAG и U -функции (Mason's Gain). Путем стандартных экстраполяций H_{21} и U -функции прямыми с наклоном 20 дБ/дек находились предельные частоты усиления транзистора по току F_t и по мощности F_{max} . Кроме того, с целью определения параметров транзисторов, необходимых для проектирования усилителей, были рассчитаны параметры малосигнальной эквивалентной схемы транзистора, максимально соответствующие измеренным S -параметрам (табл. 3).

Как видно, основные параметры НЕМТ – G_m , C_{gs} , R_g , C_{gd} , C_{ds} – увеличиваются пропорционально общей ширине затвора W_g , как и должно быть. Внутренние сопротивления – R_j и R_{ds} – изменяются практически обратно пропорционально W_g . В то же время паразитные емкости, индуктивности и сопротивления, связанные с топологией транзистора и его монтажом на пластине, изменяются незначительно ($R_g, C_{gp}, L_g, R_d, C_{dp}, L_d$ и др.).

Полученные эквивалентные схемы транзисторов позволяют выполнить так называемую процедуру де-эмбединга (deembedding), т.е. вычленения параметров «внутреннего» транзистора, что необходимо для разработки более сложных устройств на их основе. Эта процедура заключается в удалении паразитных элементов $R_g, C_{gp}, L_g, R_d, C_{dp}, L_d, R_s, L_s$. Один из полученных результатов сравнения измеренных и рассчитанных по модели усилительных характеристик для транзистора с $W_g = 2 \times 30$ мкм показан на рис. 4, а графически полученные зависимости F_t и F_{max} от W_g до и после де-эмбединга – на рис. 5. Очевидна сильная зависимость внешних и внутренних параметров транзисторов от W_g , которая нуждается в объяснении.

Таблица 3

Значения параметров элементов эквивалентной схемы НЕМТ

Наименование параметра	Ширина затвора транзистора W_g , мкм			
	2×30	2×40	2×60	2×80
G_m , мС	0,067	0,0893	0,134	0,179
C_{gs} , пФ	0,057	0,076	0,114	0,17
R_i , Ом	1,37	1,5	2	2
L_g , Гн	0,085	0,085	0,084	0,087
R_g , Ом	4,4	4,3	4,5	4,7
C_{gp} , пФ	0,052	0,054	0,054	0,054
C_{gd} , пФ	0,0132	0,0173	0,026	0,0347
R_j , Ом	20	15	10	8
R_s , Ом	2,8	2,5	2,5	2,38
L_s , Гн	0,015	0,0153	0,015	0,016
C_{ds} , пФ	0,0282	0,036	0,054	0,072
R_{ds} , Ом	270	202	110	82
R_d , Ом	1,14	3	3	7,5
C_{dp} , пФ	0,027	0,027	0,027	0,027
L_d , Гн	0,045	0,038	0,045	0,031
t , пс	0,3	0,3	0,3	0,3

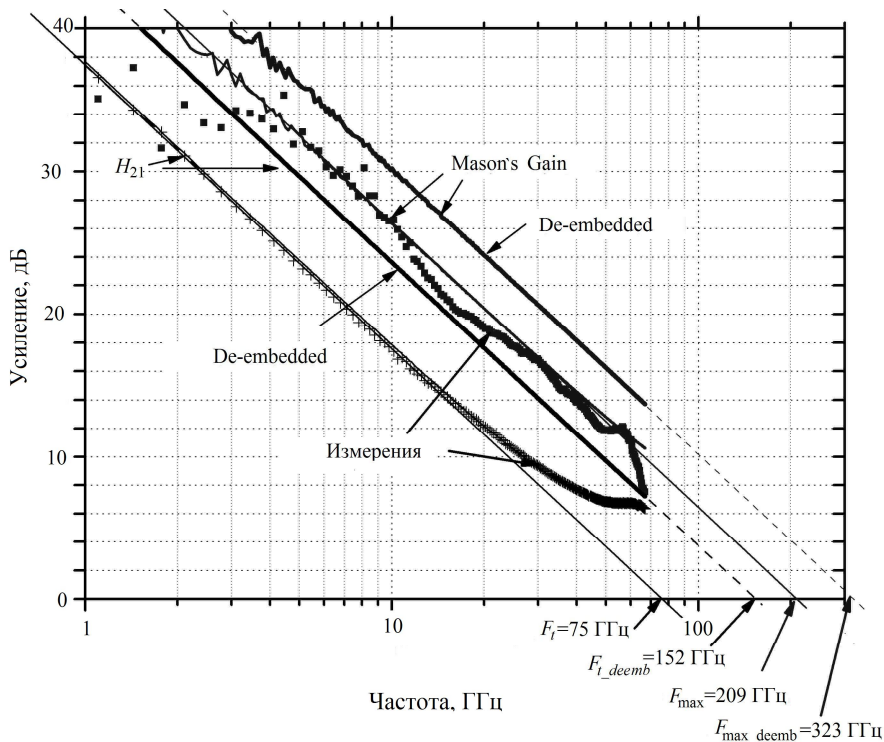


Рис. 4. Зависимости $|H_{21}|$ и U -функции (Mason's Gain) от частоты для InP НЕМТ с $W_g = 2 \times 30$ мкм (символы – измерения, линии – расчет)

Для объяснения полученных результатов следует проанализировать упрощенные выражения для частоты отсечки «внутреннего» транзистора F_c , а также предельных частот F_t и F_{max} :

$$F_c = \frac{G_m}{2\pi C_{gs}} = \frac{\langle V_e \rangle}{2\pi L_g};$$

$$F_t \approx \frac{F_c}{1 + (R_s + R_d)G_d + \frac{C_{gd}}{C_{gs}}(1 + G_m(R_s + R_d)) + \frac{C_{pg}}{C_{gs}}(1 + G_m R_s)} ;$$

$$F_{\max} \approx \frac{F_t}{\sqrt{4G_d(R_g + R_s + R_i) + 2\frac{C_{gd}}{C_{gs}}(\frac{C_{gd}}{C_{gs}} + G_m)}} .$$

Из их анализа видно, что частота отсечки F_c должна быть постоянна для всех измеренных транзисторов (независимо от W_g) и в нашем случае имеет значение $F_c = 0,067$ [См]/(2×3,14×0,057 [пФ]) = 187 ГГц. Она же определяет величину отсечки «внутреннего» транзистора, поскольку, как следует из приведенных выражений, $F_{t_deemb} = F_c/(1+C_{gd}/C_{gs})$, т.е. не зависит от W_g . Подставив значения параметров из табл. 3, можно получить, что в данном случае $F_{t_deemb} = 151,8$ ГГц. Однако величина F_t прибора в целом (измеренная) должна возрастать с ростом W_g , поскольку уменьшается отношение C_{gp}/C_{gs} в знаменателе, что и наблюдается на практике.

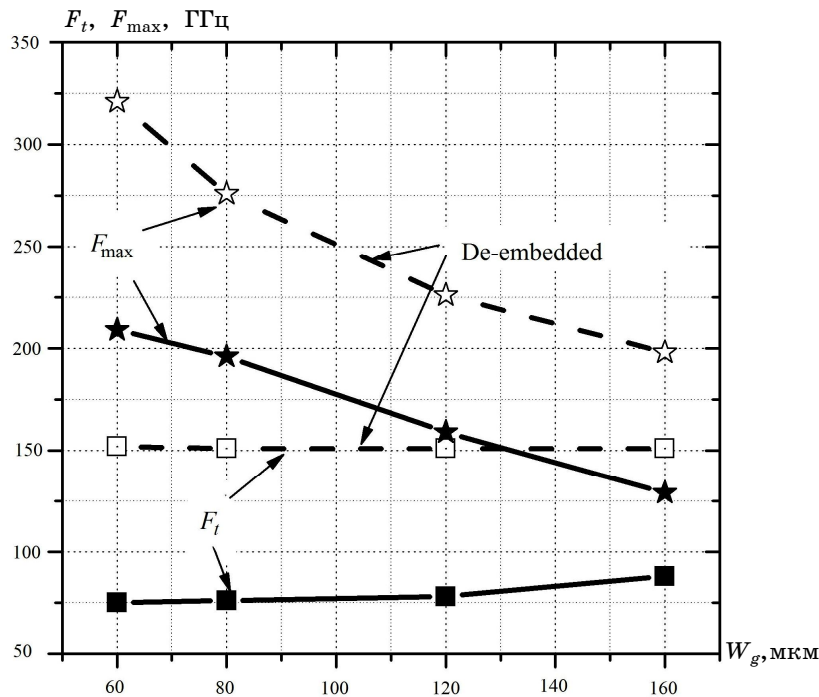


Рис. 5. Зависимости предельных частот F_t и F_{\max} от ширины затвора W_g до и после процедуры деэмбеддинга

Дальнейшее повышение частотных свойств таких приборов, очевидно, будет определяться уменьшением L_g и повышением мольной доли In в канале.

Литература

1. How Cost-Efficient Phosphide Changes the Telecommunication Industry's Competitive Landscape / D. Streit, A. Oki, R. Lai, A. Gutierrez-Aitken, et. al. // Compound Semiconductor Magazine. – 2000. – Issue 6, № 3. – P. 234–235.
2. Arsenic Stabilization of InP Substrates for Growth of $Ga_xIn_{1-x}As$ Layers by Molecular Beam Epitaxy / G. Davies, R. Heckingbottom, H. Ohno et al. // Appl. Phys. Lett. – 1980. – Vol. 37, № 3. – P. 290–292.
3. Weich D.F. Calculation band discontinuity for $Ga_{0.47}In_{0.53}As/Al_{0.48}In_{0.52}As$ heterojunction / D.F. Weich, G.W. Wick, L.F. Eastman // J. Appl. Phys. – 1984. – № 55(8). – P. 3176–3179.
4. Free carrier and many-body effects in absorption spectra of modulation-doped quantum wells / G. Livescu, D.A.B. Miller, D.S. Chemla et al. // IEEE J. Quantum Electron. – 1988. – Vol. 24, № 8. – P. 1677–1689.

Проанализировать выражение для F_{\max} сложнее, но отметим, что величины G_m и G_d , входящие в его знаменатель, возрастают пропорционально W_g , т.е. падение F_{\max} с ростом W_g вполне естественно.

Заключение

Таким образом, в результате разработки технологии МЛЭ роста изоморфных гетероструктур $In_{0,53}Ga_{0,47}As/In_{0,52}Al_{0,48}As$ на подложках InP и изготовления НЕМТ на их основе впервые в России созданы приборы миллиметрового диапазона с F_t до 150 ГГц и F_{\max} до 323 ГГц, соответствующие мировому уровню для заданной длины затвора $L_g = 0,18$ мкм.

5. Температурные фотолюминесценции структур с $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ квантовыми ямами / М.В. Карачевцева, А.С. Игнатьев, В.Г. Мокеров и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 1994. – Т. 28, вып. 7. – С. 1211–1218.

6. The impact of epitaxial layer design and quality on GaInAs/AlInAs high electron-mobility transistor performance / A.S. Brown, U.K. Mishra, J.A. Henige, M.J. Delaney // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1988. – Вып. 6 (2). – P. 678–681.

7. Absorption spectroscopy on $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ multi-quantum-well heterostructures. II. Subband structure / W. Stolz, J.C. Maan, M. Altarelli et al. // *Phys. Rev. B*. – 1987. – Vol. 36, № 8. – P. 4310–4315.

8. Lievin J. Reflection High-Energy Electron Diffraction Intensity Oscillation Study of InGaAs and InAlAs on InP: Application to Pseudomorphic Heterostructures / J. Lievin, C. Fonstad. // *Appl. Phys. Lett.* – 1987. – Vol. 51, № 15. – P. 1173–1175.

9. High Electron Mobility $18300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ in the InAlAs/InGaAs Pseudomorphic Structure Obtained by Channel Indium Modulation / T. Nakayama, H. Miyamoto, E. Oishi, N. Samoto // *J. of Electronic Materials*. – 1996. – Vol. 25, № 4. – P. 555–558.

Федоров Юрий Владимирович

Зав. лаб. Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

Тел.: +7 (499) 123-74-66

Эл. почта: yuraf2002@mail.ru

Щербакова Марина Юрьевна

Науч. сотрудник ИСВЧПЭ РАН

Тел.: +7 (499) 123-74-66

Гнатюк Дмитрий Леонидович

Мл. науч. сотрудник ИСВЧПЭ РАН

Тел.: +7 (499) 123-62-22

Яременко Наталья Георгиевна

Канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. Института радиотехники и электроники

РАН (ИРЭ РАН, филиал), г. Фрязино

Страхов Валерий Александрович

Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ИРЭ РАН

Fedorov Yu.V., Scherbakova M.Yu., Gnatyuk D.L., Yaremenko N.G., Strahov V.A.

 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ HEMT with Maximum Frequency of Oscillation up to 323 GHz

A molecular-beam technology for isomorphic heterostructures $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ on InP substrates with carrier mobility $\mu_{\text{H}} = 10640 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ and DEG concentration $n_{\text{H}} = 3,28 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ at $T = 300 \text{ °K}$ has been developed. These heterostructures were used to manufacture HEMT, which have the gate length $L_g = 180 \text{ nm}$ and two-sectional gate topology having the gate width $W_g = 2 \times 30, 2 \times 40, 2 \times 60$ and $2 \times 80 \text{ }\mu\text{m}$, by means of electron beam lithography technique. The transistors exhibit transconductance $G_m = 1000 \text{ mS/mm}$ and maximum drain current density $I_d = 800 \text{ mA/mm}$. The frequency dependencies of HEMT's S-parameters were investigated within range of 0,01 to 67 GHz. Peak cut-off frequency F_t and maximum frequency of oscillations F_{max} were found versus W_g . Parameters of the linear HEMT models for different W_g are given, and parameters of «intrinsic» transistor model are found. As for the «intrinsic» transistor, it has been found the frequencies F_t and F_{max} to be maximal for HEMTs with $W_g = 2 \times 30 \text{ }\mu\text{m}$ and equals to 150 GHz and 323 GHz, respectively.

The obtained parameters of isomorphic heterostructures and HEMT on InP substrates are close to the state-of-the-art world standards for 180 nm gate length. As we know, the given results are firstly reported in Russia.

Keywords: HEMT, InP substrate, isomorphic heterostructure, molecular-beam epitaxy.