

Разработка МИС для ППМ Ka-, V- и W-диапазонов на основе AlGaN/AlN/GaN НЕМТ

Создание пригодных для массового производства малогабаритных однокристалльных МИС ППМ миллиметрового диапазона для экстремальных условий эксплуатации на основе гетероструктур AlGaN/GaN особенно актуально в настоящее время. Это предполагает решение ряда научных, технологических и конструкторских проблем. В данной работе приведены первые результаты разработки и исследования как отдельных функциональных МИС для ППМ Ka-, V- и W-диапазонов, так и однокристалльных многофункциональных модулей в монолитном исполнении для V-диапазона на нитридных гетероструктурах.

Гетероструктуры. С целью повышения СВЧ параметров МИС совместно с ЗАО "Элма-Малахит" была проведена работа по созданию гетероструктур с уменьшенной толщиной барьерного слоя t_b . Параметры гетероструктур представлены в Таблице.

Номер г/с	t_b , нм (X_{Al})	μ_e , $cm^2/V.c$	n_e , $10^{13} cm^{-2}$	$R_{сл}$, Ом/кв	$I_{нас}$, А/мм	I_{ds0} , А/мм
V-1440 [1]	15.3 (32%)	1880	1.3	260	2.08	1.2
V-1910	15.7 (31%)	1880	1,28	259	2.05	1.2
V-1911	13.7 (31%)	2300	1,28	212	2.05	1.1
V-1966	13.2 (38.7%)	1944	1,34	240	2.14	1.3
V-1990	13.2 (39%)	2000	1,32	237	2.11	1.2
V-1991	11.7 (39%)	1720	1,43	254	2.29	1.4
V-1912	11.2 (31%)	2040	1,16	264	1.86	0.85

По мере утонения t_b гетероструктур и технологии затворов наблюдалось повышение частотных параметров НЕМТ (Рис. 1), как результат повышения аспектного отношения L_G/t_b . Однако, наилучшие результаты $f_T > 100$ GHz при $f_{MAX} > 200$ GHz (Рис. 2) были получены на г/с V-1911, не с минимальной толщиной t_b , но с максимальной величиной подвижности μ_e , что предполагает большую величину дрейфовой скорости электронов. Предельно достижимый коэффициент усиления НЕМТ на частоте 90 ГГц в этом случае составлял 7 дБ.

Разработка МИС УМ W-диапазона [1]. Наилучшие СВЧ параметры двух - и трех-каскадных усилителей W-диапазона были получены на г/с V-1911. Исследования малосигнальных S-параметров изготовленных усилителей, тестовых транзисторов и пассивных структур в диапазоне до 110 ГГц, а также измерения выходной мощности МИС на частоте 92 и 94 ГГц были проведены совместно с ФГУП "НПП "Исток". По результатам измерений было установлено, что как двух-, так и трех-каскадные усилители имеют равномерное усиление в полосе частот 83 - 95 ГГц. Максимальный коэффициент усиления 3-х каскадных МИС УМ достигает 14-15 дБ (Рис. 3). КСВ по входу и выходу менее 2. Коэффициент усиления двухкаскадных усилителей достигает 8 дБ. Каждый каскад МИС состоит из двух параллельно включенных транзисторов с $W_G = 2 \times 50$ мкм. Отметим, что расчетные коэффициенты усиления МИС УМ на частоте 90 ГГц соответственно 11 дБ и 15 дБ.

В ходе измерений выходной мощности в волноводном тракте зафиксирована максимальная насыщенная мощность 20,26 дБм (106 мВт) при входной мощности 12,2 дБм и

напряжении питания 14 В (Рис. 4). Удельная выходная мощность выходного каскада УМ при этом достигает 530 мВт/мм.

Параметры МИС УМ, полученные в настоящей работе, хорошо соответствуют лучшим зарубежным образцам [2, 3] по коэффициенту усиления и удельной выходной мощности.

Таким образом, впервые в России получены работоспособные образцы монолитных интегральных схем W-диапазона, демонстрирующие принципиальную возможность создания отечественной элементной базы диапазона частот до 100 ГГц на нитридных гетероструктурах.

В настоящее время в рамках Госконтракта «Исследование перспективных типов сверхвысокочастотных приборов, разработка технологических принципов их изготовления (монолитные интегральные схемы усилителей для диапазона частот 92-96 ГГц)» (шифр «2013-24-14-426-0004-001») совместно с НИЦ «Курчатовский институт» ведутся работы по совершенствованию СВЧ параметров МИС УМ, в частности за счет развития технологии нитридных гетероструктур и невдвигаемых омических контактов.

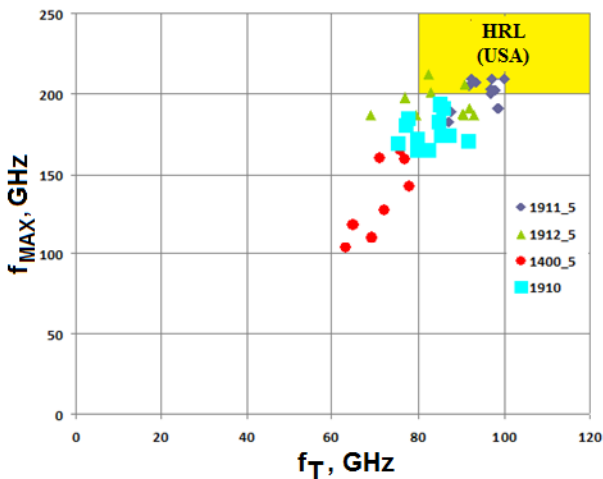


Рисунок 1. Повышение f_T и f_{MAX} НЕМТ по мере утонения барьера гетероструктур

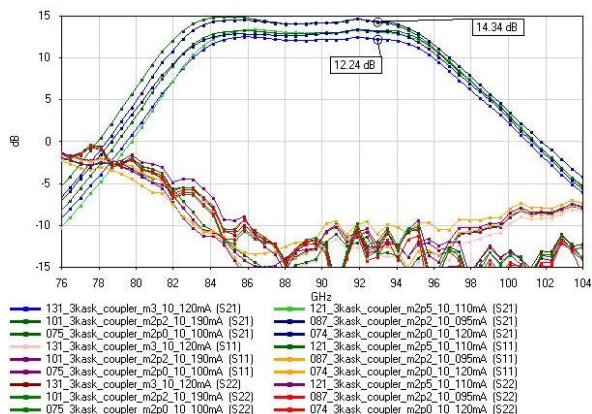


Рисунок 3. Малосигнальные СВЧ параметры МИС 3-х каскадного усилителя мощности

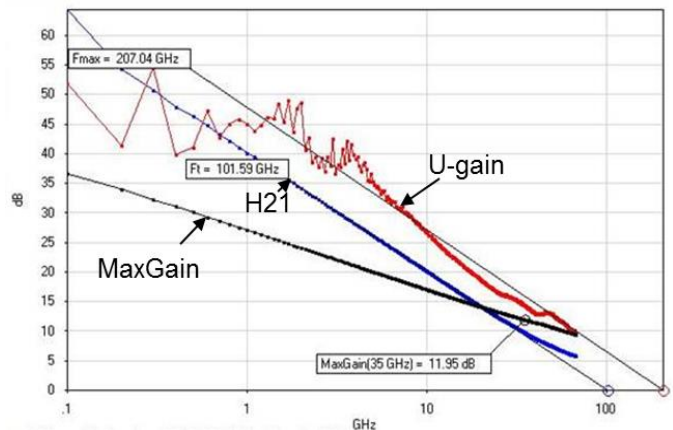


Рисунок 2. СВЧ параметры НЕМТ на г/с V-1911

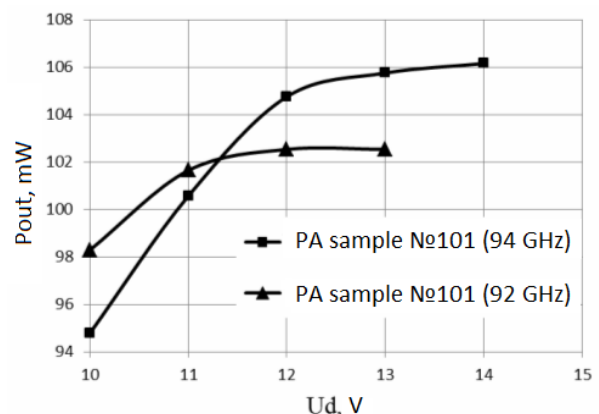


Рисунок 4. Зависимость выходной мощности МИС УМ от напряжения питания (г/с V-1911)

Разработка функциональных МИС для ППМ Ка- и V-диапазонов.

Предварительные исследования показали, что создание таких модулей на основе копланарной технологии невозможно ввиду проблем с обеспечением устойчивости таких систем и наличием частотно-зависимых фазовых набегов по общим проводникам. Это проявляется уже при создании активных квадратурных смесителей или повышения усиления и выходной мощности МИС УМ. За рубежом МИС на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, как правило, изготавливают по микрополосковой технологии, подразумевающей травление сквозных отверстий сквозь подложку. Однако это связано с серьезными технологическими трудностями. Частично решение данной проблемы может быть облегчено при переходе к гетероструктурам на кремниевых подложках, но в настоящее время такие гетероструктуры недоступны. В ходе выполнения настоящей работы нами было найдено конструкторско-технологическое решение данной проблемы, заключающееся в создании "заземляющей плоскости" над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10-15 мкм (фотолак, разработка ИВС РАН). При этом заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации.

По разработанному технологическому процессу впервые в России на нитридных гетероструктурах на подложках из сапфира были изготовлены ряд монолитных интегральных схем для ППМ Ка-диапазона (квадратурный демодулятор, квадратурный модулятор) и V-диапазона - отдельно МИС УПЧ, ГУН, балансный смеситель, МШУ, УМ, а также 2 варианта (приемный и приемно-передающий) многофункциональных МИС в составе: ГУН, балансный смеситель, УПЧ. Проведены предварительные измерения характеристик МИС зондовым способом на пластинах в диапазоне частот до 67 ГГц.

В ходе исследования малосигнальных S-параметров тестовых транзисторов с периферией затворов 2x50 мкм зафиксированы максимальные величины предельной частоты усиления по току и напряжению на уровне 56 ГГц и 151 ГГц соответственно. Температурные зависимости СВЧ характеристик транзисторов без теплоотвода приведены на Рис. 5, а).

МИС квадратурного модулятора (в нескольких вариантах реализации) Ка-диапазона был исследован в режиме ограниченной функциональности, а именно - использовались только два из четырех дифференциальных входов ПЧ (0 и 90 градусов) и пониженная мощность сигнала гетеродина. Измеренные величины коэффициента преобразования составляют -3 – +1 дБ. Эти значения хорошо согласуются с расчетами, соответствующими условиям измерений. В режиме полной функциональности расчетные значения коэффициента преобразования составляют от +2 до +7 дБ (в зависимости от варианта реализации МИС).

МИС УПЧ диапазона частот 0,1 - 2 ГГц имеет коэффициент усиления более 20 дБ при коэффициенте шума 2 дБ. При увеличении температуры до +120°C (без теплоотвода) величина S₂₁ уменьшается на 1 дБ на частоте 1 ГГц и на 2,5 дБ на частоте 2 ГГц в постоянной рабочей точке.

МИС усилителя диапазона частот 57 - 64 ГГц имеет коэффициент усиления до 11 дБ. В зависимости от рабочей точки усилитель может служить в качестве МШУ или УМ.

Насыщенная выходная мощность составляет 15-17 дБм. Линейная выходная мощность составляет 10 - 11 дБм. Точка компрессии 1 дБ составляет 0 - 3 дБ (рис. 5, б).

Выходная мощность МИС ГУН составляет 10-14 дБм. Диапазон перестройки частоты 65-70 ГГц. Стабильность частоты генерации от напряжения питания не хуже 200 МГц/В (при $U_{п}=10$ В). Относительное изменение частоты генерации при изменении температуры от +25 до +55°C в постоянной рабочей точке составляет $\Delta F/F < 0,3\%$. Установлено, что попытки обеспечить постоянную величину частоты генерации путем поддержания постоянной величины потребляемого тока за счет отпириания транзисторов не приводят к успеху. Однако этого можно добиться за счет уменьшения рассеиваемой на транзисторах мощности (запириания транзистора) (Рис. 6, б). Это может свидетельствовать о том, что в данном случае именно эффект само-разогрева транзисторов, а не температура окружающей среды, является определяющей причиной изменения частоты генерации ГУН.

Потери преобразования МИС смесителя V-диапазона составляют -9 - -10 дБ при частоте гетеродина 60 ГГц в диапазоне изменения частоты ВЧ от 61 до 67 ГГц.

Предварительные исследования МИС приемного и приемопередающего модулей V-диапазона продемонстрировали их работоспособность.

Полученные результаты свидетельствуют, что разработанная технология создания "заземляющей плоскости" над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ элементами пригодна для изготовления многофункциональных СВЧ МИС для диапазона частот до 70 ГГц и выше.

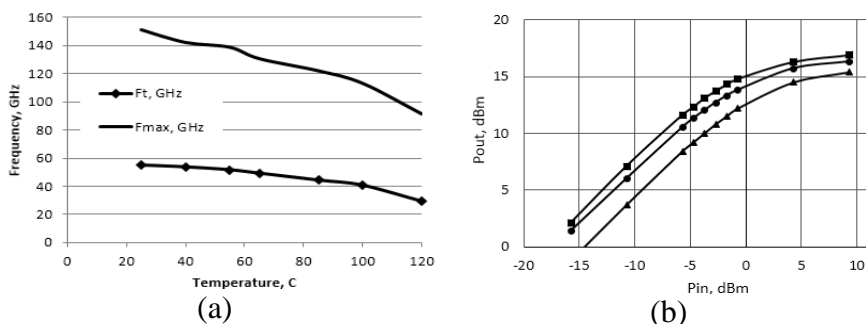


Рисунок 5. Температурная зависимость СВЧ характеристик транзистора 2×50 мкм (а);

Измеренные динамические характеристики трех образцов МИС УМ на частоте 60 ГГц (б)

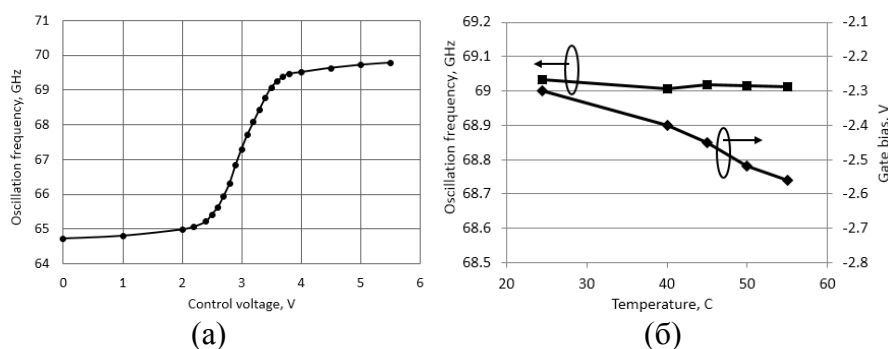


Рисунок 6. Измеренная зависимость частоты генерации МИС ГУН от управляющего напряжения (а); Температурная зависимости частоты генерации от напряжения смещения (б)

Библиографический список

1. Д.Л. Гнатюк, Р.Р. Галиев, М.Ю. Щербакова, А.Ю. Павлов, С.В. Михайлович, Ю.В. Федоров, Тезисы докладов 9-й Всероссийской конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, МГУ, 13 – 15 Июня, 2013 г.) с. 203.
2. A. Brown, K. Brown, J. Chen, K. C. Hwang, N. Koliias, R. Scott «W-Band GaN Power Amplifier MMICs», 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 5-10 June 2011.
3. M. van Heijningen, van der Bent, M. Rodenburg, F. E. van Vliet, R. Quay, P. Bruckner, D. Schwantuschke, P. Jukkala, T. Narhi «94 GHz power amplifier MMIC development in state of the art MHEMT and AlGaIn/GaN technology», Microwave Technology and Techniques Workshop 2012, 21-23 May 2012, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
4. Федоров Ю.В., Михайлович С.В. Влияние параметров наногетеро-структур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN HEMT. Нано- и микросистемная техника, 2014, №10, стр. 12-17.