

П. П. Мальцев

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ-НА-КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ ЧАСТОТ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН

Мальцев Петр Павлович,
директор,
д.т.н., профессор

Аннотация: в работе показана возможность создания российских систем на кристалле (СНК) для СВЧ и КВЧ диапазонов частот, включающих интегрированные антенны, усилители, МЭМС коммутаторы, преобразователи частоты и генераторы, управляемые напряжением. Все микросхемы производятся на основе единой базовой технологии изготовления МИС с использованием РНЕМТ и МНЕМТ гетероструктур арсенида галлия, что позволяет интегрировать их в единую СНК, обеспечивающую малые потери в тракте между элементами системы, низкий уровень шумов и большую передаваемую мощность. Приведены измеренные характеристики полученных в ИСВЧПЭ РАН МИС в сравнении с зарубежными аналогами для диапазона от 5 до 60 ГГц.

ИСВЧПЭ РАН в последние годы проводил НИР по созданию встроенных антенн и МЭМС коммутаторов для диапазонов частот 5 и 10-12 ГГц в рамках ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 годы по заказу Минобрнауки России. В результате разработаны новые технологические приемы и конструктивно-технические решения, на которые получены свидетельства о регистрации топологий интегральных схем [1-6].

Низший тип резонанса в антенне возникает при длине излучателя $L \approx \lambda/2$, где $\lambda \approx \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость подложки, λ_0 – длина волны в вакууме. Таким образом, габариты антенны пропорциональны длине волны и обратно пропорциональны диэлектрической проницаемости подложки, то есть при увеличении частоты, а также при переходе на наногетероструктуры АЗВ5 с большей диэлектрической проницаемостью размер антенны будет уменьшаться [7]. Эти технологические достижения позволяют от традиционной схемы ячейки АФАР (рис. 1) перейти к схеме с индивидуальными встроенными антеннами для передающего и приемного трактов (рис. 2), реализуемой в виде одной или нескольких монокристаллических интегральных схем.

Данная схема обеспечивает малые потери в тракте между малозумящим усилителем (МШУ) и антенной, что снижает коэффициент шума приемного тракта, повышает передаваемую мощность передающего тракта. МЭМС коммутатор на входе усилителя мощности (УМ) оперирует сигналом малого уровня по сравнению с первой схемой.

В качестве основной базовой технологии создания СВЧ и КВЧ монокристаллических интегральных схем (МИС) применяются РНЕМТ и

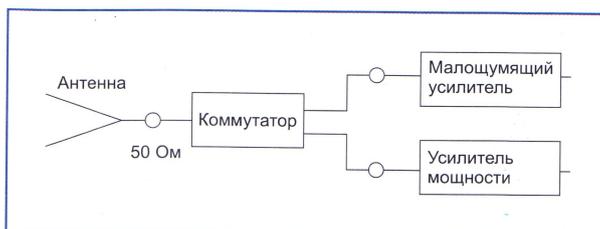


Рис. 1. Схема с общей антенной для МШУ и УМ



Рис. 2. Схема с индивидуальной встроенной антенной для МШУ и УМ

МНЕМТ гетероструктуры на арсениде галлия. Основные параметры гетероструктур приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип образца	Содержание In в канале	T=300 K		T=77 K	
		$n_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu_{2\text{DEG}}, \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$n_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu_{2\text{DEG}}, \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
PHEMT на GaAs	21%	1,68	7690	2,1	27100
dd-PHEMT на GaAs	21%	2,3	7500	2,5	20900
МНЕМТ на GaAs	34%	2,6	10390	2,42	41300
	53%	3,2	12176	3,15	32853

При создании систем-на-кристалле (СНК) с базовой технологией PHEMT на пластине арсенида галлия формируются МИС УМ или МШУ и встроенные антенны [8].

На рис. 3 изображено поперечное сечение пластины. Пассивные элементы формируются на непроводящем слое, образованном путем жидкостного химического травления активных проводящих слоев гетероструктуры.

Следует отметить, что создание PHEMT МИС связано с развитием электронно-лучевой литографии в ИСВЧПЭ РАН на базе электронно-лучевого нанолитографа RAITH150-TWO. На рис. 4 показано, что полученные в ИСВЧПЭ РАН характеристики транзисторов ложатся на прямую, отражающую зависимость внутренней частоты отсечки транзисторов от длины затвора, составленную в ETRI (Научно-исследовательский институт электроники и телекоммуникаций, Республика Корея) и соответствуют мировому уровню.

В качестве иллюстрации приведен ряд полученных в ИСВЧПЭ РАН грибообразных затворов с 2008 по 2011 гг. (рис. 5).

Примеры разработанных СНК, включающих антенный элемент и усилитель, представлены на рис. 6. Размеры СНК: 9,5x6,5 мм² для 5 ГГц, 5,4x6,5 мм² для диапазона частот 10-12 ГГц.

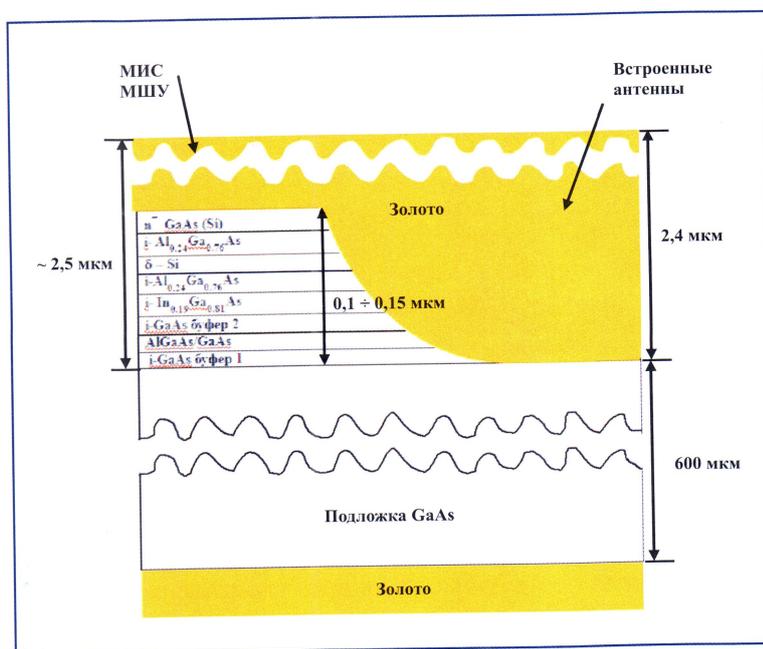


Рис. 3. Поперечное сечение пластины для активных и пассивных элементов СНК

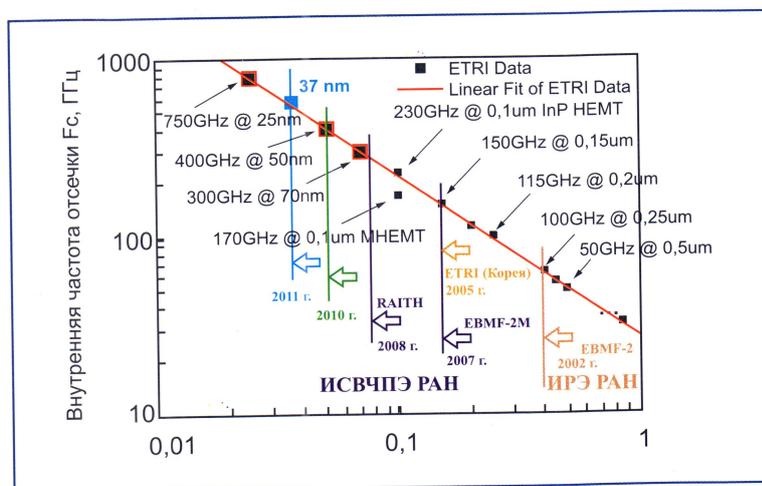


Рис. 4. Развитие ИСВЧПЭ РАН: уменьшение длины затвора в сравнении с мировым уровнем

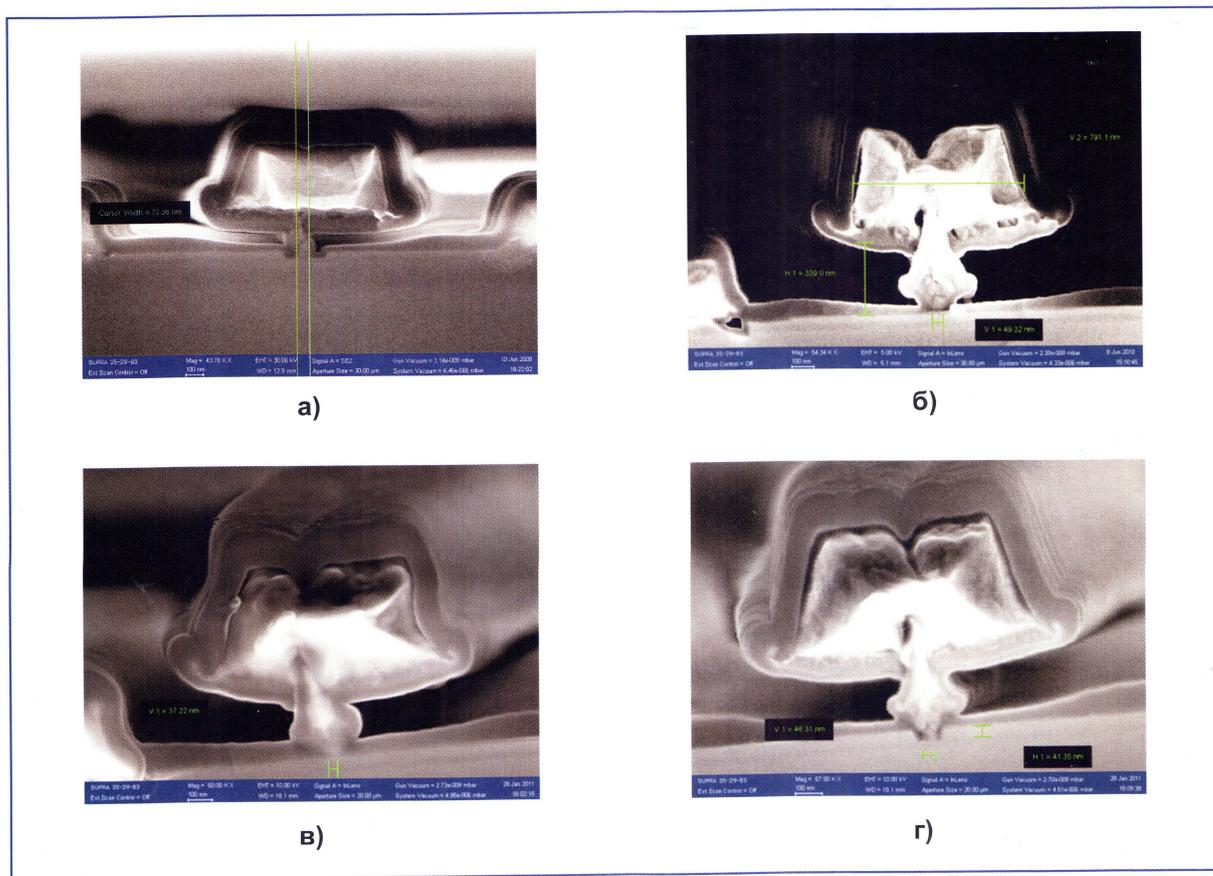


Рис. 5. Грибообразные затворы, полученные с помощью электронно-лучевого нанолитографа RAITH150:
 а) 75 нм, 2008 год, б) 50 нм, 2010 год, в) 41 нм, 2011 год, г) 37 нм, 2011 год

В процессе измерений антенный излучатель устанавливался на земляной экран разных размеров, что влияет на форму диаграммы направленности. При исследовании антенны размером $6 \times 8 \text{ мм}^2$ для диапазона 5 ГГц, размер земляного экрана составил $30 \times 30 \text{ мм}^2$. Минимум потерь отражения составил -13 дБ на частоте 5,5 ГГц (КСВ~1.6), полученная диаграмма направленности близка к кардиоидной (рис. 7а и 7б). Область излучения расположена над антенным элементом, направление максимальной интенсивности излучения перпендикулярно плоскости антенного элемента. Топология антенного элемента для диапазона 10-12 ГГц построена на основе топологии антенны для диапазона 5 ГГц, но с уменьшением разме-

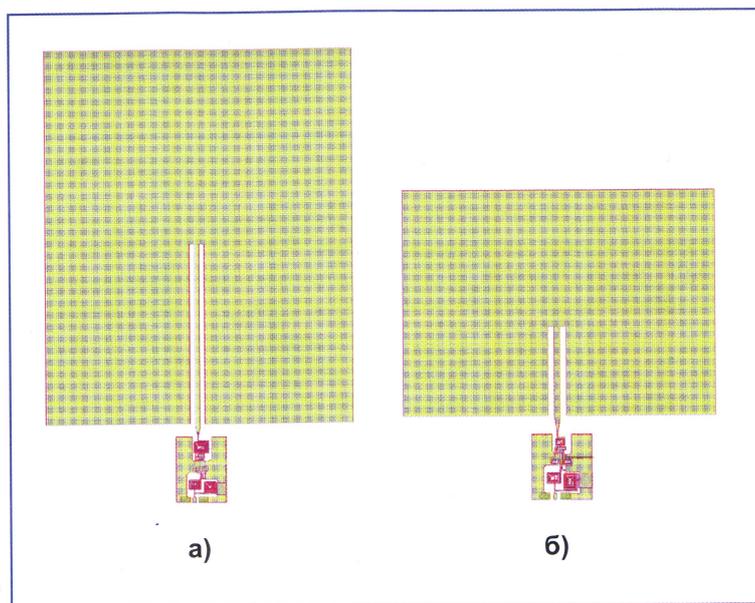


Рис. 6. Топология СНК, включающей МШУ и антенный элемент:
 а) для 5 ГГц, б) для 10-12 ГГц

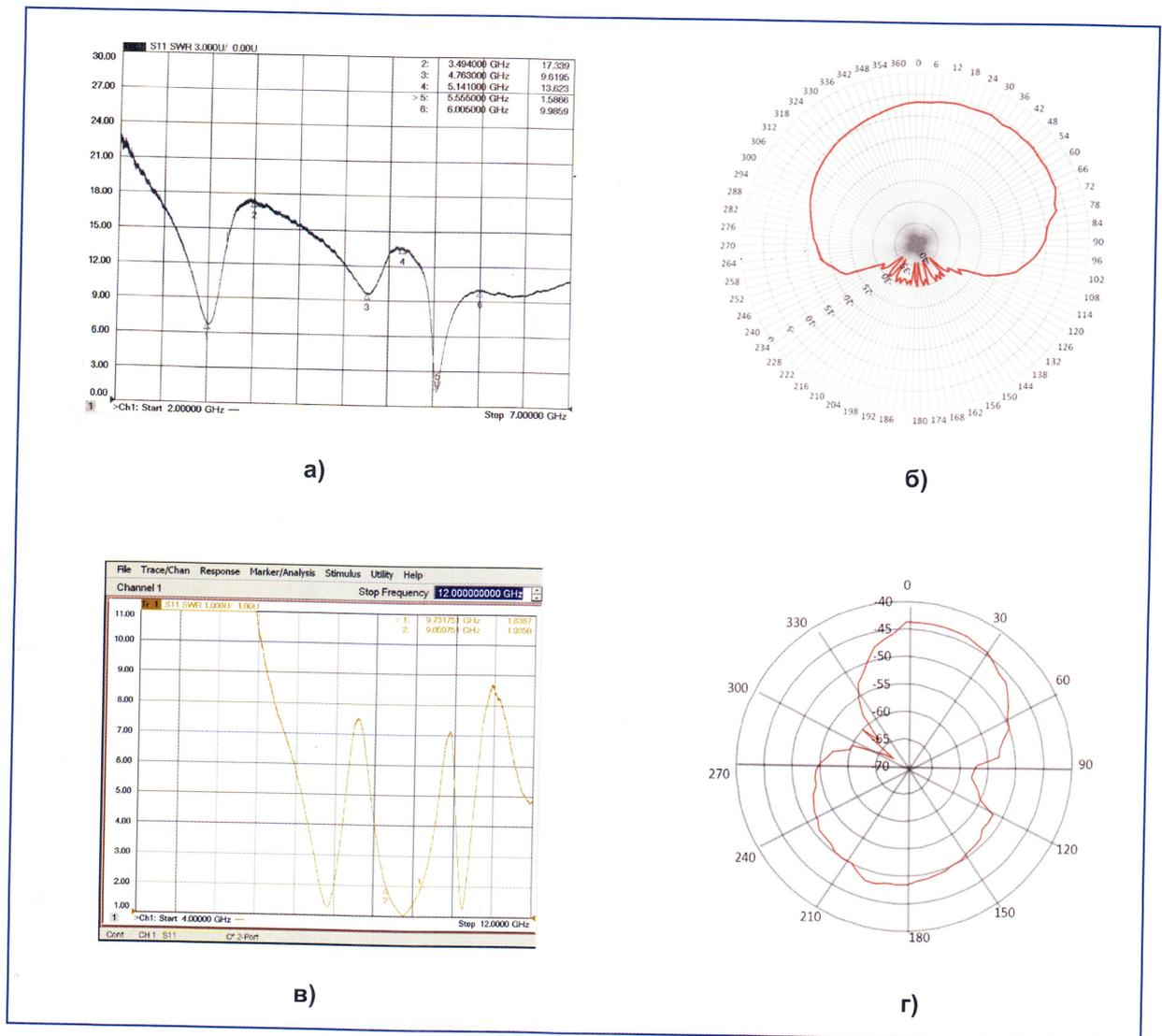


Рис. 7. Потери отражения и диаграмма направленности антенных элементов:
 а) и б) – для 5 ГГц, в) и г) – для диапазона 10-12 ГГц

ров в соответствии с меньшей длиной волны, так что размер составил $3,8 \times 5 \text{ мм}^2$. Измерения проводились при земляном экране большего размера, а именно, $50 \times 50 \text{ мм}^2$. Измеренная диаграмма направленности оказалась тороидальной и имеет два лепестка (рис. 7 г). Полученные при измерениях потери отражения имеют два минимума: в полосе 9-10 ГГц и 10,6-10,8 ГГц (рис. 7 в). При этом КСВ в минимумах достигает значений 1-1,3, что соответствует значениям потерь отражения порядка -18 – -35 дБ.

Следует отметить, что в мире наметилась тенденция по использованию МЭМС коммутаторов в СВЧ диапазоне. Основные параметры МЭМС коммутатора, выполненного в ИСВЧПЭ РАН, и его зарубежных аналогов для диапазонов 1-40 ГГц сведены в сравнительную табл. 2. Их внешний вид представлен на рисунке 8.

Для формирования МЭМС коммутатора использовались те же технологические приемы и имеющееся технологическое оборудование, что и при формировании усилителей и антенн на подложках GaAs. Изготовление переключателей в виде мембран с емкостным соединением возможно с использованием отработанного при изготовлении МИС на GaAs технологического приема формирования «воздушных мостов». На рис. 9 представлены полученные с помощью векторного анализатора потери пропускания МЭМС коммутатора в открытом и закрытом режимах.

Важно отметить, что в ИСВЧПЭ РАН продолжают освоение КВЧ диапазона частот и создание первого комплекта МИС для К диапазона. В рамках ФЦП «Развитие электронной компо-

Таблица 2

Варианты СВЧ МЭМС	Размер, мкм	Напряжение, В	Время переключения, мкс	Емкость, пФ	Изоляция, дБ	Диапазон частот, ГГц	Потери, дБ	Материал подложки
ИСВЧПЭ РАН	750x250	10-20	-	0,2-2.5	-35 (24 ГГц)	20-25	-0,2	GaAs
Raytheon	310x120	30-50	3	1-6	-20 (10 ГГц)	10-40	-0,07	Si, GaAs
Мичиганский университет	600x250	6-20	20-40	1-3	-25 (30 ГГц)	1-40	-0,1	Si, GaAs
Мичиганский университет	300-90	15-25	6-15	0,5-3	-30 (30 ГГц)	10	-0,03	Si, GaAs
HRL	140-100	40-60	2-4	0.002	-44 (2-4 ГГц)	5-10	-0,2	GaAs

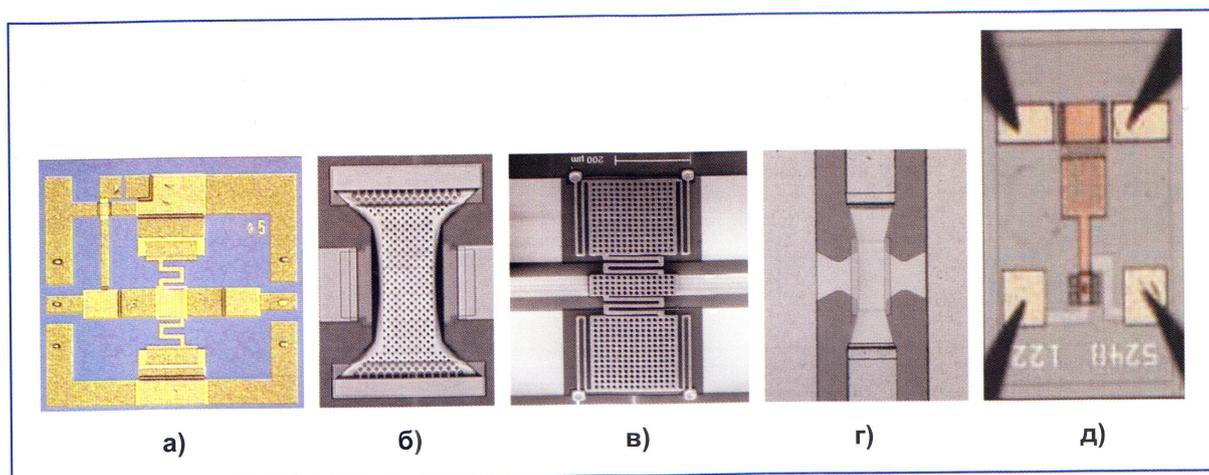


Рис. 8. Внешний вид СВЧ МЭМС коммутаторов (а – выполнен в ИСВЧПЭ РАН, б – компании Raytheon, в и г – Мичиганского университета, д – выполнен в лаборатории Hughes Research)

нентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 по заказу Госкорпорации «Росатом» созданы МИС:

- монолитная интегральная схема «трехкаскадный маломощный усилитель на основе РНЕМТ наногетероструктур арсенида галлия»;
- монолитная интегральная схема «трехкаскадный усилитель средней мощности на основе НЕМТ наногетероструктур нитрида галлия»;
- монолитная интегральная схема «резистивный смеситель с активными элементами в транзисторном включении на основе РНЕМТ наногетероструктур арсенида галлия»;
- монолитная интегральная схема «генератор, управляемый напряжением на основе РНЕМТ наногетероструктур арсенида галлия».

Полученные результаты МИС и их зарубежные аналоги приведены в табл. 3-6. На рис. 10-12 представлены фотографии МИС, входящих в комплект.

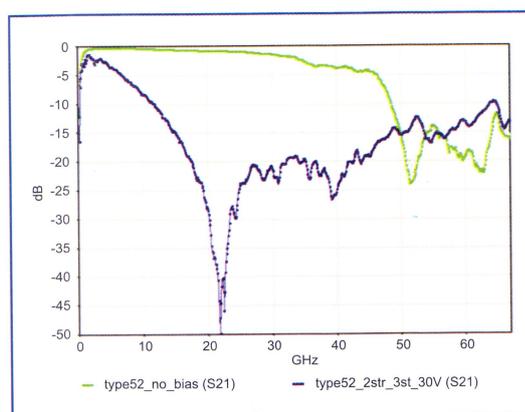


Рис. 9. Потери пропускания МЭМС коммутатора в открытом (зеленая линия) и закрытом (синяя линия) режимах

Таблица 3

Показатель	МИС МШУ	Зарубежный аналог Triquint TGA4511-EPU
Диапазон частот, ГГц	30-37,5	30-38
Коэффициент усиления, дБ, не менее	18	15-18
Коэффициент шума, дБ, не более	2,5-4	2,5-3
КСВ входа, не более	2	2,2
Напряжение питания, В	5	3,5
Ток потребления, мА	Не более 60	110
Габариты, мм x мм	1,15x1,0	1,8x2,7

Таблица 4

Показатель	МИС усилитель средней мощности	Зарубежный аналог Avago AMMC-5040
Диапазон частот, ГГц	30-37,5	30-38
Коэффициент усиления, дБ, не менее	18	25
Выходная мощность по снижению усиления 1 дБ, мВт, не менее	300	100
КСВ входа, не более	2	2,2
Напряжение питания, В	5	4,5
Ток потребления, мА	Не более 500	300
Габариты, мм x мм	1,0x1,6	0,76x1,7

Таблица 5

Показатель	МИС смеситель	Зарубежный аналог HITTITE HMC266
Диапазон частот, ГГц	30-37,5	20-40
Диапазон частот гетеродина, ГГц	18	10-20
Диапазон промежуточных частот (ПЧ), ГГц	1-2	1-3
Коэффициент шума, дБ, не более	9	12
КСВ входа, не более	2	2,2
Развязка гетеродин – входной сигнал, дБ, не менее	40	20
Развязка гетеродин – выход ПЧ, дБ, не менее	40	48
Напряжение питания, В	6	-
Ток потребления, мА	Не более 80	-
Габариты, мм x мм	1,9x2,5	1,34x1,5

Таблица 6

Показатель	МИС генератор, управляемый напряжением	Зарубежный аналог НПТТТЕ НМС398QS16G
Диапазон частот, ГГц	15-18	14-15
Количество выходных каналов	2	1
Выходная мощность в канале, мВт	5-10	2-4,6
Подавление второй гармоники дБ, не менее	15	12
Напряжение питания, В	5	5
Ток потребления, мА	Не более 200	260
Габариты, мм x мм	1,4x2,2	В корпусе 4x6,2

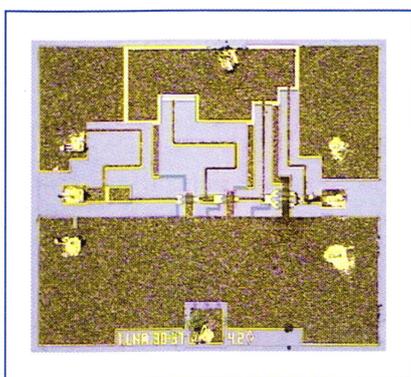


Рис. 10. МИС МШУ

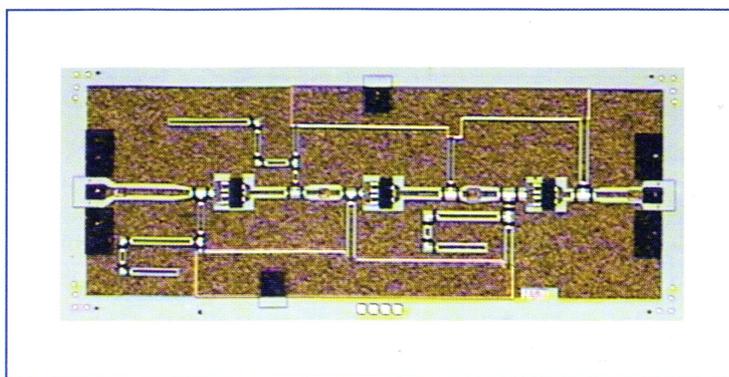


Рис. 11. МИС усилитель средней мощности

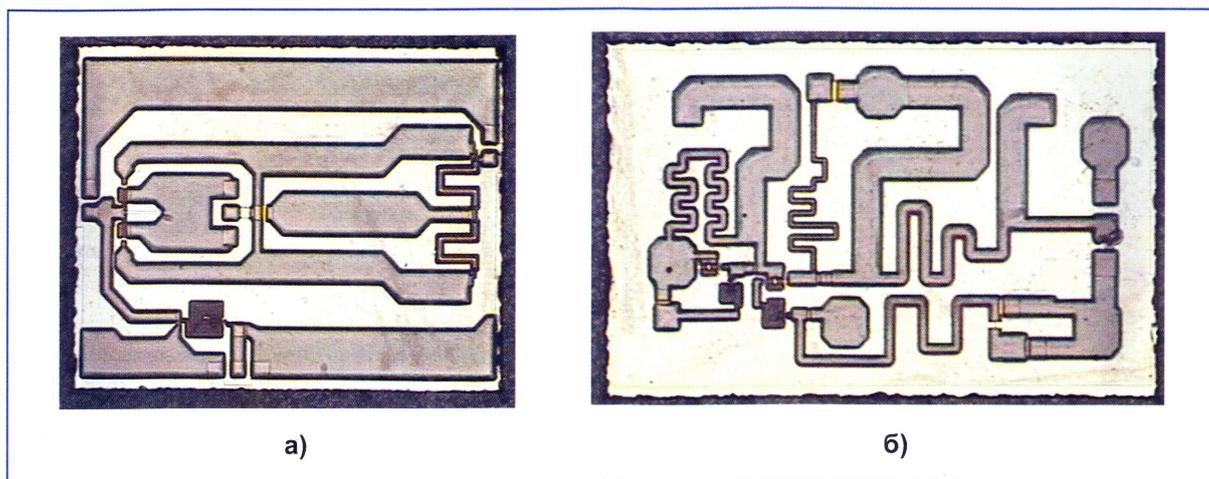


Рис. 12. МИС смеситель (а), МИС генератор, управляемый напряжением (б)

Выводы:

Учитывая накопленный опыт в разработке МИС, возможно интенсивное развитие систем на-кристалле СВЧ и КВЧ диапазона. Сравнение размеров компонентов СВЧ и КВЧ представлено в табл. 7. Как видно из таблицы, антенны в К диапазоне и выше не вносят существенного прироста площади в МИС. На частоте 60 ГГц (5-миллиметровый диапазон) можно расположить на длине полуволны на расстоянии 2,5 мм приемную и передающую антенну с расположением между ними МШУ и УМ, которые будут представлять интегрированный приемопередающий модуль.

Таблица 7

Оценка уменьшения размеров элементов СнК с увеличением рабочей частоты

Компоненты СВЧ и КВЧ СнК	Размеры компонентов, мм x мм				
	5 ГГц	10-12 ГГц	18-20 ГГц	30-40 ГГц	57-64 ГГц
	рНЕМТ	рНЕМТ	рНЕМТ	рНЕМТ, мНЕМТ	мНЕМТ
МШУ	1,1x1,2	1,1x1,2	1,1x1,0	1,0x1,0	1,1x1,0
Встроенная антенна	8x6	5x4	3x2	1x0,9	0,7x0,6
МЭМС коммутатор	0,75x0,25	0,75x0,25	0,75x0,25	0,75x0,25	0,75x0,25

Литература:

1. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Широкополосный малозумящий усилитель», регистрационное свидетельство № 2011630032 от 04.02.2011.
2. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Монолитный интегральный трехкаскадный малозумящий усилитель КВЧ диапазона», регистрационное свидетельство № 2011630034 от 11.02.2011.
3. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Интегральный антенный элемент со встроенным малозумящим усилителем для диапазона 5 ГГц», регистрационное свидетельство № 2011630058 от 05.05.2011.
4. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Интегральный антенный элемент со встроенным малозумящим усилителем для диапазона 10-12 ГГц», регистрационное свидетельство № 2011630059 от 05.05.2011.
5. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Прямоугольный интегральный антенный элемент со встроенным малозумящим усилителем для диапазона 10-12 ГГц», регистрационное свидетельство № 2012630008 от 10.01.2012.
6. Мальцев П.П., Федоров Ю.Ф., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л. Топология ИМС «Прямоугольный интегральный антенный элемент со встроенным малозумящим усилителем для диапазона 5 ГГц», регистрационное свидетельство № 2012630001 от 10.01.2012.
7. Жою Пи, Фарук Хан. Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 3. С. 86-94.
8. Гнатюк Д.Л., Галиев Р.Р., Матвеев О.С., Федоров Ю.В. Интегрированные антенны на наногетероструктурах арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 37-38.