

УДК: 621.375.4

МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА МАЛОШУМЯЩЕГО
УСИЛИТЕЛЯ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ
ДЛЯ ДИАПАЗОНА 57–64 ГГц

Д.В. Крапухин^{1,2,@}, аспирант, инженер-исследователь
П.П. Мальцев^{1,2}, д.т.н., профессор

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва, 117105 Россия

@Автор для переписки, e-mail: d.krapukhin@gmail.com

Статья посвящена разработке малошумящего усилителя для диапазона 57–64 ГГц на гетероструктуре нитрида галлия. В ней рассмотрены уже существующие коммерческие разработки в области малошумящих усилителей диапазона 60 ГГц, определены средние характеристики усилителей данного диапазона. Выполнены измерения тестовых НЕМТ-транзисторов на нитриде галлия, на основании которых созданы модели транзисторов – модель Fujii и модель Поспешальского. Спроектирована принципиальная схема усилителя, состоящая из 4-х каскадов, и выполнен полный электродинамический расчет топологии в САПР ADS. Измерения изготовленного образца продемонстрировали работоспособность в требуемом диапазоне частот (коэффициент усиления более 16 дБ, коэффициент шума менее 6.5 дБ), хорошее соответствие результатов расчетов и измерений. Описан технологический этап формирования сквозных отверстий, обеспечивающих общую заземляющую плоскость элементов схемы.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, миллиметровый диапазон, малошумящий усилитель, НЕМТ-транзистор, коэффициент шума, наногетероструктура AlGaIn/GaN.

MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT OF GaN
LOW-NOISE AMPLIFIER FOR 57–64 GHz BANDWIDTH

D.V. Krapukhin^{1,2,@}, P.P. Maltsev^{1,2}

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

²Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy
of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105 Russia

@Corresponding author e-mail: d.krapukhin@gmail.com

The article describes the development of a low-noise amplifier for the 57-64 GHz band based on a wide-gap semiconductor – gallium nitride. We analyze existing commercial

developments in the area of low-noise amplifiers for the 60 GHz band, which are based mainly on gallium arsenide. At the initial stage we developed test HEMT-transistors on the basis of which we created the transistor models – Fujii model and Pospieszalski model. On the basis of the developed models we designed an amplifier schematic circuit consisting of 4 cascades. Based on the schematic circuit, we designed a topology of a monolithic integrated circuit in the ADS CAD, and made a complete electrodynamic calculation of the topology, which showed reachability of the required characteristics in the frequency range 57-64 GHz. Conducted measurements of a manufactured sample showed the fulfillment requirements of the range and a good agreement with the calculations. One of the features of the technology of the developed amplifier is the step of forming of electrical connections - through holes, which provide a common grounding plane of the circuit.

Keywords: monolithic integrated circuit, millimeter wave, low-noise amplifier, HEMT, noise figure, AlGaN/GaN heterostructure.

Введение

Диапазон 60 ГГц является типичным окном непрозрачности, то есть обладает сильным затуханием радиоволн в атмосфере – до 16 дБ/км, в то время как на частоте 38 ГГц затухание не превышает 0.3 дБ/км. Сильное затухание обусловлено поглощением радиоволн парами воды и молекулами кислорода, оно является и ключевым достоинством, и существенным недостатком. С одной стороны, сильное затухание делает диапазон не оптимальным для передачи сигнала на дальние расстояния (в единицы километров и более), с другой – позволяет создавать не взаимодействующие друг с другом сети и скрытые каналы связи. Во многих странах мира этот диапазон признан безлицензионным и, согласно принятым стандартам (в частности, IEEE 802.11ad и ISO/IEC 13156), на основе приборов, работающих на частоте 60 ГГц, будут создаваться локальные беспроводные сети, приемо-передающие устройства широкополосной внутрикомнатной связи, обеспечивающие высокоскоростную и скрытную передачу данных между электронными приборами. Устройства, работающие на частоте 60 ГГц, широко востребованы и в военной технике, в том числе, в перспективных образцах высокоточных систем вооружений, системах межспутниковой связи, радаров, антитеррористических системах и др.

Для создания приемного тракта приборов необходимы усилители с низким уровнем собственных шумов. Такие усилители называются малозумящими (МЗУ) и предназначены для работы со слабыми входными сигналами. Они имеют жесткие требования по максимальному коэффициенту шума.

1. Малозумящие усилители для диапазона 60 ГГц

Анализ доступных источников показал наличие на сайтах ряда производителей малозумящих усилителей диапазона 60 ГГц или близкого к нему. Разработка схем данного диапазона является сложной задачей как с точки зрения технологии (в частности, использование качественных гетероструктур), так и с точки зрения проектирования. Обнаружено лишь 13 образцов, которые созданы крупнейшими производителями СВЧ-электроники: *TriQuint*, *United Monolithic Semiconductors*, *Microsemi*, *Hittite*, *Norden Millimeter*, *Sumitomo*, *RFlambda* и *Ducommun*. Характеристики найденных образцов сведены в таблицу. У большинства усилителей в качестве материала гетероструктуры указан арсенид

Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц

галлия. По достигнутым характеристикам остальных усилителей можно предположить, что они тоже изготовлены на арсениде галлия.

Основными величинами рассмотренных усилителей являются коэффициент передачи (S_{21}) и коэффициент шума (NF). Характеристикой согласования считаются коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и уровень обратных потерь, которые связаны между собой формулой:

$$КСВН = \frac{1 + 10^{-\frac{RL}{20}}}{1 - 10^{-\frac{RL}{20}}} \quad (1)$$

где RL (Return Loss) – входные или выходные обратные потери. При хорошем согласовании значение КСВН менее 2, что соответствует уровню обратных потерь менее -10дБ.

Сводная таблица характеристик МШУ диапазона 60 ГГц

Производитель	Серийный номер	Технология	Рабочая частота, ГГц	S_{21} , дБ	IRL, дБ	ORL, дБ	NF, дБ	Ток, мА	Напряжение, В
TriQuint [1]	TGA4600	GaAs pHEMT	57-65	13	-20	-6	4	41	3
Sumitomo Electric Industries [2]	FMM5716X	GaAs	57-64	22	-10	-15	4.5	30	3
United Monolithic Semiconductor [3]	CHA2159	GaAs pHEMT	55-65	20	-8	-10	4	115	3.5
United Monolithic Semiconductor [4]	CHA2157	GaAs pHEMT	55-60	8	-4	-8	4.5	80	3.3
Microsemi [5]	MMA036AA	Не указана	0-65	10.5	-28	-12	2.3*	85	4.5
Microsemi [5]	MMA035AA	Не указана	0-65	-	-	-	4.5*	150	7
Microsemi [5]	MMA034AA	Не указана	0-65	-	-	-	5.5*	250	8
Analog Devices (Hittite) [6]	HMC-ALH382	GaAs	57-65	23	-12	-11	4.6	64	2.5
RF-LAMBDA [7]	R50G69GSA	Не указана	50-69	10.5	-14	-16	3.8	220	5
RF-LAMBDA [8]	R50G69GSB	Не указана	50-69	23	-11	-14	5-6	152	5
RF-LAMBDA [9]	R50G69GSC	Не указана	50-69	39	-7	-6	4	227	5
Ducommun [10]	ALN-61086015	GaAs pHEMT	57-65	15	-10	-10	6	100	12
Ducommun [10]	ALN-61086030	GaAs pHEMT	57-65	30	-10	-10	6	150	12

* приведено значение коэффициента шума на 20 ГГц.

S_{21} – малосигнальный коэффициент усиления;

IRL (Input Return Loss) – входные обратные потери;

ORL (Output Return Loss) – выходные обратные потери;

NF (Noise Figure) – коэффициент шума (КШ).

Внешний вид топологии показан только для трех образцов: TriQuint TGA4600, Sumitomo Electric Industries (SEI) FMM5716X и UMS CHA2159 (рис. 1).

Трехкаскадный МШУ компании TriQuint (TGA4600) предназначен для диапазона частот 57–65 ГГц (рис. 1а). Усилитель построен по 0.15 мкм pHEMT-технологии с использованием микрополосок и трехслойной металлизации, габариты монолитной интегральной схемы (МИС) 1.62×0.84 мм [1]. Коэффициент усиления достигает значения 13–14 дБ,

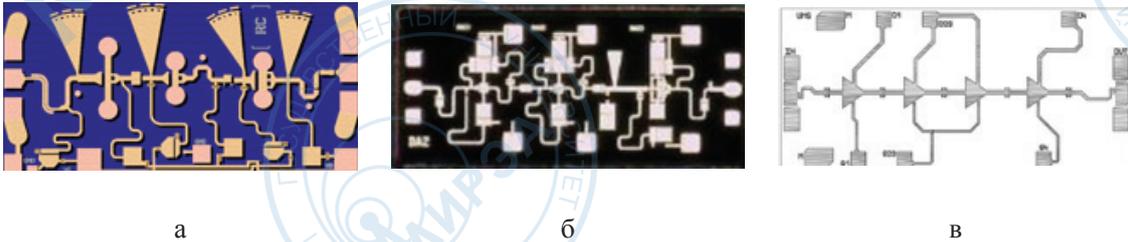


Рис. 1. Внешний вид МШУ: TriQuint TGA4600 (а), SEI FMM5716X (б) и UMS CHA2159 (в).

а коэффициент шума – около 4 дБ в рабочей полосе.

Малошумящий усилитель японской компании *Sumitomo Electric Industries* для диапазона 57–64 ГГц описан в работе [2], его внешний вид показан на рис. 1б. Усилитель имеет 3 каскада, построен по микрополосковой технологии на гетероструктуре арсенида галлия. Коэффициент усиления составил 20–22 дБ в рабочей полосе, коэффициент шума – 4.5–5 дБ. Габариты кристалла 1.54×0.7 мм.

На рис. 1в схематично показан четырехкаскадный усилитель французско-германской компании *United Monolithic Semiconductors* [3]. Усилитель построен по рНЕМТ-технологии с длиной затвора 0.15 мкм, имеет рабочий диапазон 55–65 ГГц и габариты МИС 2.35×1.11 мм. Усилитель относится к категории малошумящих, но одновременно позиционируется производителем и как усилитель мощности. Коэффициент усиления составляет около 20 дБ в рабочем диапазоне. Уровень шума, заявленный производителем – 4–4.8 дБ.

Таким образом, по результатам анализа усилителей, размещенных на сайтах производителей, можно сделать следующие выводы:

- в диапазоне 57–64 ГГц доступно крайне малое количество усилителей, что свидетельствует о сложности разработки схем данного диапазона, при этом российские аналоги отсутствуют;
- доминирующее положение в указанных усилителях занимает арсенид-галлиевая технология, которая обладает и ведущим положением на рынке СВЧ-электроники в целом;
- характеристиками мирового уровня можно считать коэффициент усиления около 10–20 дБ, уровень шума от 4 до 6 дБ, при хорошем согласовании входа и выхода; ток потребления 100–200 мА при напряжении питания 2.5–8 В; средние габариты МИС составили около 1.5×1.5 мм.

Отсутствие отечественных разработок и особенности диапазона 57–64 ГГц делают разработку МИС данного диапазона необходимым направлением развития российской СВЧ-электроники. Хотя МШУ изготавливаются, как правило, на GaAs-гетероструктурах, перспективным является создание приборов на широкозонных полупроводниках, в частности, на нитриде галлия. Использование широкозонного полупроводника позволит повысить выходную мощность и коэффициент усиления, что важно при создании целых приемо-передающих модулей на одном кристалле, а также снизить габариты и сделать усилитель более стойким к внешним воздействиям.

Целью настоящей работы явилась разработка МШУ на нитриде галлия для диапазона частот 57–64 ГГц, с коэффициентом передачи более 16 дБ, коэффициентом шума менее 6.5 дБ, при хорошем согласовании входа и выхода (КСВН входа и выхода менее 2) и работающего при напряжении питания 5–10 В (ток потребления не более 100 мА).

2. Проектирование МИС МШУ для диапазона 57–64 ГГц на нитриде галлия

На начальном этапе создания МИС нами изготовлены тестовые транзисторы (внешний вид показан на рис. 2) и проведены измерения S-параметров и вольт-амперных характеристик. По результатам измерений построены модели транзисторов: нелинейная модель Fujii (эквивалентная схема показана на рис. 3) и линейная модель Поспешальского (эквивалентная схема изображена на рис. 4).

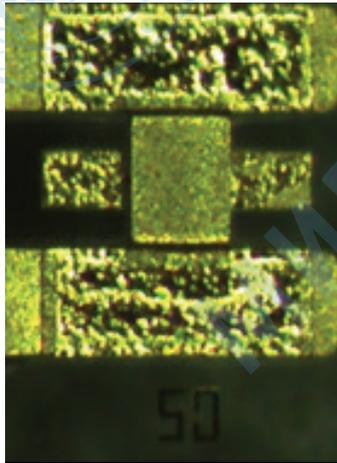


Рис. 2. Внешний вид тестового транзистора 2×50 мкм.

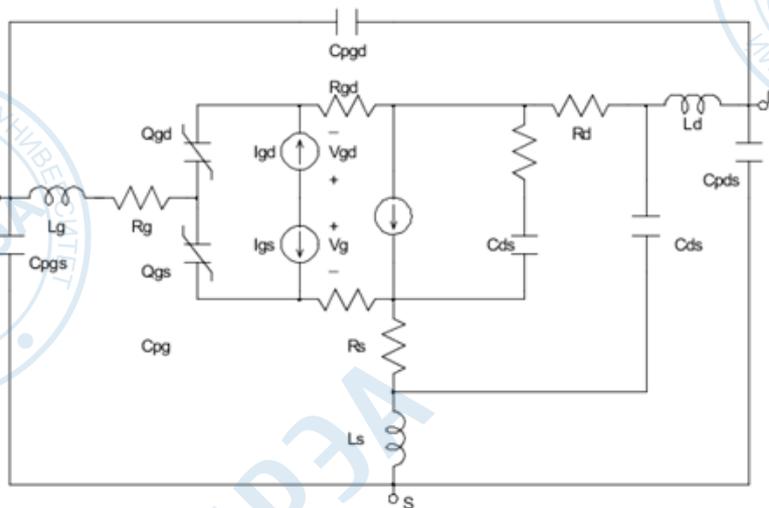


Рис. 3. Эквивалентная схема нелинейной модели транзистора Fujii.

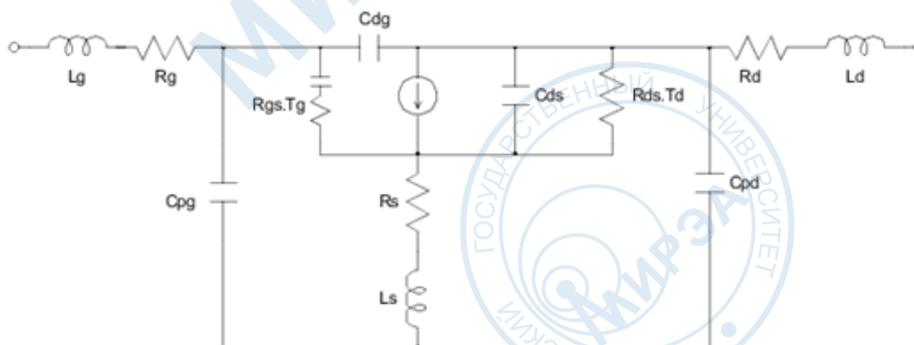


Рис. 4. Эквивалентная схема линейной модели транзистора Поспешальского.

Построенная нелинейная модель Fujii хорошо согласуется с результатами измерений: на рис. 5 показано сравнение результатов измерений вольт-амперных характеристик и значений, полученных по модели.

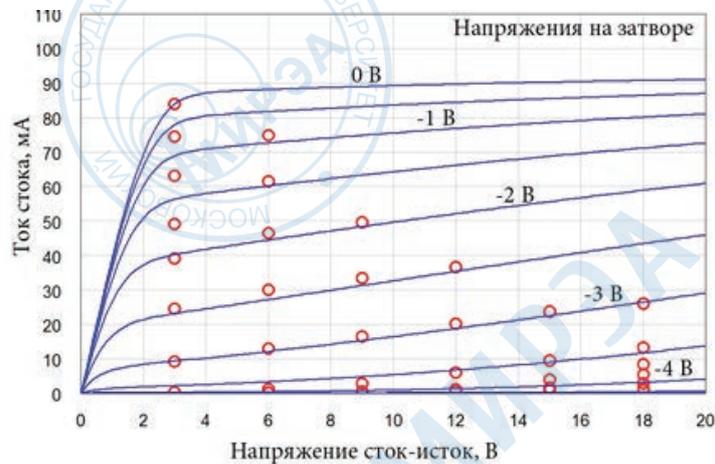


Рис. 5. Вольтамперная характеристика транзистора (« \circ » – измеренные в рабочих точках значения, «-» – значения, рассчитанные по нелинейной модели).

Оценку коэффициента шума осуществляли по модели транзистора Поспешальского. Для оптимизации параметров этой модели используется одна рабочая точка, для которой также измерены значения коэффициента шума (рис. 6, серая линия).

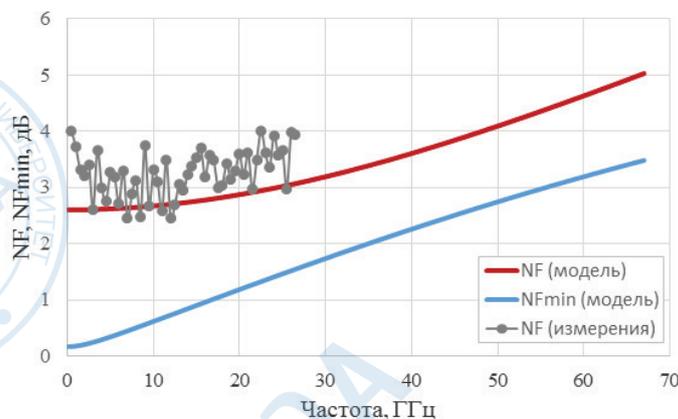


Рис. 6. Зависимость значений коэффициента шума в 50-Омном включении (красная линия), минимального коэффициента шума (синяя линия) по модели транзистора Поспешальского, измеренного коэффициента шума (серая линия) от частоты.

Согласно приведенным на рис. 6 результатам, расчетный коэффициент шума на частоте 60 ГГц составил около 4.5 дБ, что допускает возможность создания МШУ с расчетным коэффициентом шума менее 6.5 дБ.

Все расчеты проводили с использованием моделей НЕМТ-транзисторов, описанных выше, на гетероструктурах AlGaIn/GaN/сапфир с неутонченной подложкой толщиной 340 мкм и обратной металлизацией. Используемые транзисторы имеют величину коэффициента MaxGain около 6 дБ в диапазоне частот от 57 до 64 ГГц, таким образом, использование 4-х каскадов должно позволить достичь требуемых параметров (коэффициент передачи более 16 дБ).

Разрабатываемый усилитель имеет требования по коэффициенту шума, причем согласно формуле Фрииса, наибольший вклад в суммарный уровень шума оказывает первый каскад. Поэтому согласование импедансов первого каскада выполнено с учетом достижения минимального коэффициента шума. Формула Фрииса для расчета уровня шума имеет вид:

$$F_{sys} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (2)$$

где F_{sys} – уровень шума схемы;

F_i – шум i -го каскада;

G_i – коэффициент усиления i -го каскада.

На начальном этапе осуществляли схемотехническое моделирование усилителя в САПР Microwave Office на сосредоточенных элементах. Это наиболее простое моделирование, главным достоинством которого является быстрое получение результатов. Входная, выходная и межкаскадные согласующие цепи образованы конденсаторами и микрополосковыми линиями. Усилитель «собирается» из библиотечных элементов САПР, задается соответствующая подложка, и после этого осуществляется оптимизация значений элементов, расчет характеристик и построение необходимых зависимостей. Согласование входа выполнялось на достижение минимального уровня шума. Принципиальная схема разработанного МШУ показана на рис. 7 [11].

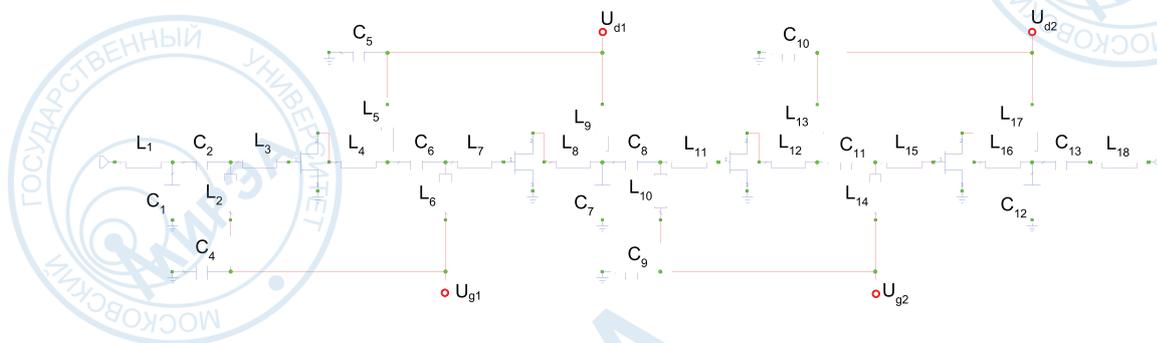


Рис. 7. Принципиальная схема четырехкаскадного усилителя.

Схемотехническое моделирование не является достаточно точным для того, чтобы по его результатам изготавливать МИС. Во-первых, сосредоточенные элементы не полностью отражают поведение реальных элементов в СВЧ-диапазоне, при этом, чем выше диапазон, тем сильнее несоответствие между реальным и библиотечным элементами. Во-вторых, с повышением частоты уменьшаются не только размеры элементов, но и расстояние между ними, то есть компоновка элементов становится более плотной, и необходимо учитывать их взаимное влияние друг на друга. С целью учета этих факторов мы проводили электродинамическое моделирование и необходимые корректировки элементов. Для электродинамического моделирования схема, полученная при моделировании на сосредоточенных элементах, создается в виде топологии (рис. 8) в САПР Advanced Design System (ADS): размеры МШУ составили 1.15×2.26 мм. МИС усилителя имеет 6 разварочных площадок: вход, смещение на затворы транзисторов (2 шт.), питание (2 шт.), выход.

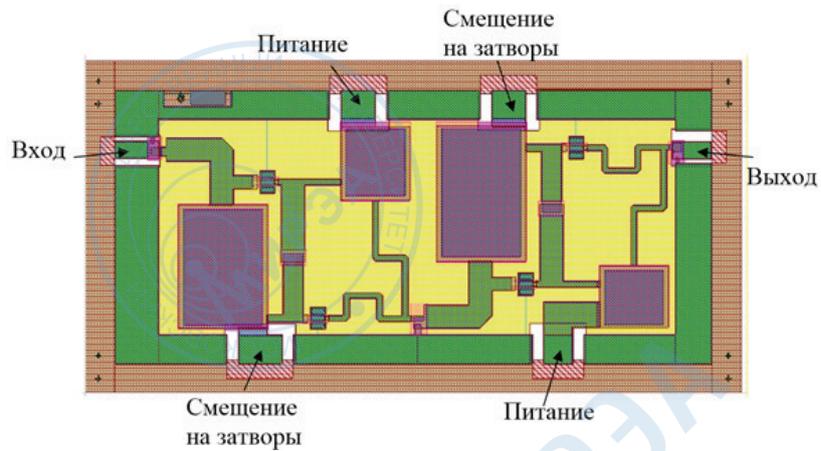
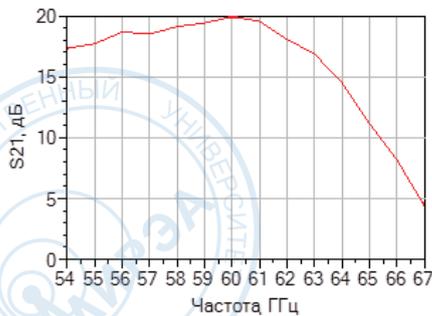


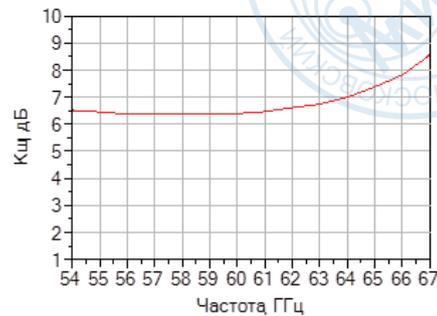
Рис. 8. Топологический проект четырехкаскадного усилителя.

Результаты электродинамического расчета топологического проекта четырехкаскадного усилителя в САПР ADS представлены на рис. 9. Как видно из приведенных графиков, построенных для напряжения питания 5 В, в диапазоне частот 57–64 ГГц коэффициент передачи составляет 15–20 дБ, КСВН по входу и выходу менее 2, коэффициент шума – примерно 6.4 дБ.

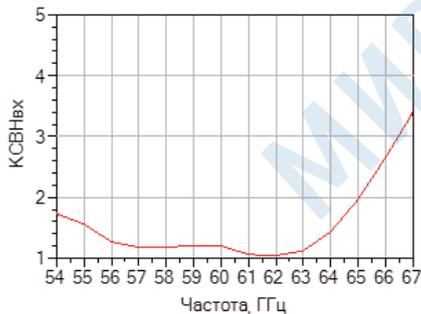
Таким образом, согласно полученным результатам расчетов, требуемые параметры достижимы. Расчетный ток потребления усилителя составил 70–100 мА [12].



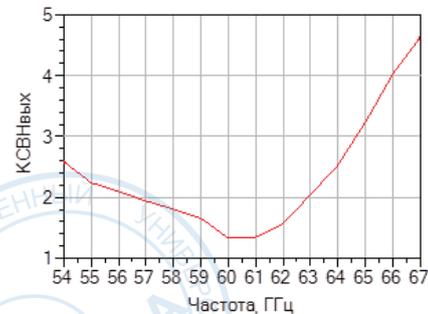
а) зависимость коэффициента передачи от частоты



б) зависимость коэффициента шума от частоты



в) зависимость КСВН по входу от частоты



г) зависимость КСВН по выходу от частоты

Рис. 9. Расчетные характеристики МШУ для диапазона 57–64 ГГц.

3. Формирование межэлектрических соединений, обеспечивающих общую «землю»

Особенностью технологического маршрута, помимо стандартных для нитридной технологии этапов, явился процесс формирования межэлектрических соединений, обеспечивающих общую «землю». На «заземляющую плоскость» должны быть выведены истоки транзисторов и «земли» элементов МИС через металлизированные отверстия, что обеспечит общий электрический контакт одного общего электрода. Схемы на арсениде галлия достаточно легко утончаются до толщин менее 100 нм и хорошо химически травятся, обеспечивая, таким образом, возможность изготовления сквозных отверстий с металлизацией обратной стороны. В схемах на нитриде галлия создание «заземляющей плоскости» при микрополосковой технологии связано с серьезными технологическими трудностями: невозможностью сверления отверстий в подложках сапфира, низкой скоростью травления подложек из SiC, еще более низкой скоростью травления буферного слоя AlGaN/GaN. Частично решение данной проблемы может быть облегчено при переходе к наногетероструктурам на кремниевых подложках, но в настоящее время такие наногетероструктуры недоступны.

Найдено конструкторско-технологическое решение данной проблемы, заключающееся в создании «заземляющей плоскости» не с обратной стороны, а сверху лицевой поверхности пластины [13], то есть слой металла наносится поверх слоя полимерного диэлектрика (фотолак, разработка ИВС РАН), который, в свою очередь, нанесен поверх уже изготовленных элементов МИС. При этом заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации; поперечное сечение пластины показано на рис. 10.

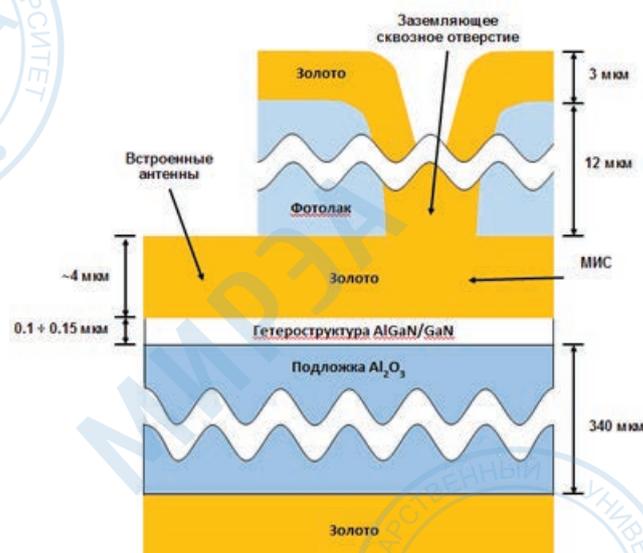


Рис. 10. Поперечное сечение пластины с фотолаком.

Использовали фотолак толщиной 12 мкм, в котором формировался рисунок со вскрытыми окнами для доступа к контактным площадкам, в фотолаке также могут быть сделаны окна для встроенных антенн.

4. Измерения МИС МШУ для диапазона 57–64 ГГц

Выполнены измерения малосигнальных S-параметров и коэффициента шума кристаллов МШУ (внешний вид показан на рис. 11). Измерения проводили после нанесения фотолоака и резки пластины на кристаллы.

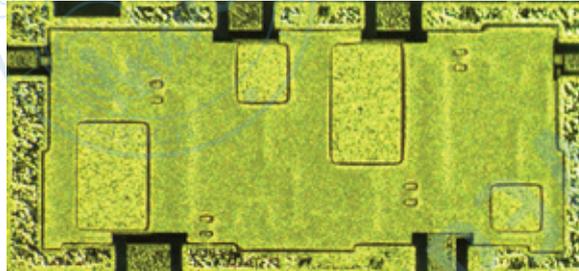
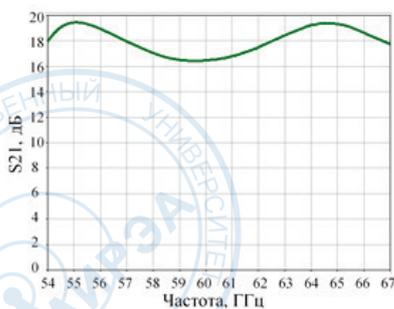


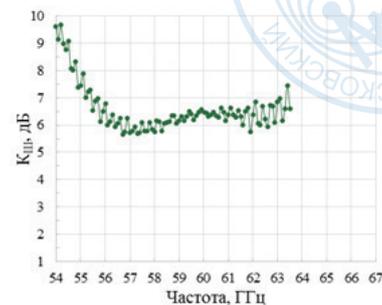
Рис. 11. Внешний вид МШУ после нанесения фотолоака с верхней металлизацией.

Измерения кристаллов проводили зондовым способом, без оснастки и теплоотвода, в непрерывном режиме по питанию. При измерении малосигнальных S-параметров определяются: коэффициент передачи, КСВН входа и выхода и ток потребления, отдельно измеряли коэффициент шума.

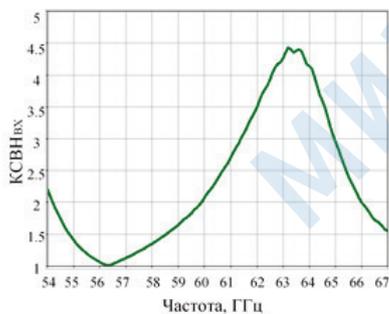
На рис. 12 показаны результаты измерений типового образца МШУ.



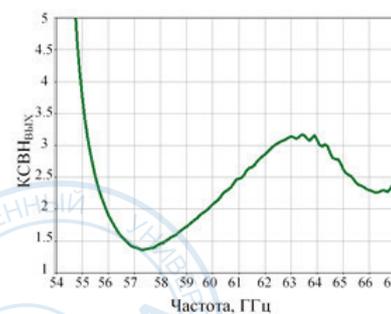
а) зависимость коэффициента передачи от частоты



б) зависимость коэффициента шума от частоты



в) зависимость КСВН по входу от частоты



г) зависимость КСВН по выходу от частоты

Рис. 12. Измеренные характеристики типового образца МШУ.

Зависимость малосигнального коэффициента усиления от частоты, несмотря на небольшой сдвиг в более низкочастотную область, имеет хорошую однородность в рабочем диапазоне 57–64 ГГц и имеет значение более 16 дБ. При этом зависимость КСВН входа от частоты имеет пик возрастания в середине рабочего диапазона, и этот пик сильно сужает выбор оптимальной рабочей частоты (необходимым условием является КСВН входа и выхода менее 2). КСВН выхода не имеет такого явного пика возрастания, но имеет ярко выраженную точку минимума на частоте 57–58 ГГц. Результаты измерений коэффициента шума показали наличие минимума у всех образцов на частоте 57 ГГц и дальнейшее возрастание с повышением частоты. Таким образом, с точки зрения значения коэффициента шума, оптимальной является работа усилителя на более низкой частоте рабочего диапазона 57–64 ГГц.

В целом, измерения показали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Все измеренные образцы достигают требуемых значений всех характеристик в диапазоне 57–64 ГГц. При этом оптимальная рабочая точка подавляющего большинства усилителей находится на частоте 57 ГГц, кроме тех образцов, в которых на этой частоте наблюдается пик КСВН входа, для этих образцов оптимальная рабочая точка сдвинута в более высокочастотный диапазон.

Заключение

Разработанный усилитель является единственным устройством, разработанным на гетероструктурах нитрида галлия – широкозонного полупроводника. Помимо положительных свойств, обусловленных использованием в качестве материала гетероструктуры полупроводника с широкой запрещенной зоной, наблюдается чуть большее, чем у аналогов, значение коэффициента шума. При этом разработанный усилитель не требует ограничителя мощности на входе, который необходим для усилителей на гетероструктурах GaAs и ухудшает их суммарный уровень шума. Отметим, что согласно последним работам [14], в оптимальных условиях изготовления нитридные НЕМТ-транзисторы могут иметь более низкий коэффициент шума, чем арсенидные. По совокупности характеристик усилитель ИСВЧПЭ РАН находится на уровне лучших мировых образцов. В перспективе характеристики МШУ на нитриде галлия могут быть улучшены за счет совершенствования технологии и освоения отечественных подложек из карбида кремния, совершенствования гетероструктур и повышения MaxGain транзисторов, а также использования теплоотвода [15].

Литература:

1. TriQuint, TGA4600, 60GHz Low Noise Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.triquint.com/products/p/TGA4600> (дата обращения 01.05.2016)
2. Sumitomo Electric Device Innovations Inc., FMM5716X, 60GHz Low Noise Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.sedi.co.jp/data.jsp?version=en&database=wireless&id=6634&class=01020400> (дата обращения 01.05.2016)
3. United Monolithic Semiconductors, CHA2159, 55-65GHz Low Noise / Medium Power Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.ums-gaas.com/all-products-selection-guide.php> (дата обращения 01.05.2016)

4. United Monolithic Semiconductors, CHA2157, 55-60GHz Low Noise / Medium Power Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.ums-gaas.com/all-products-selection-guide.php> (дата обращения 01.05.2016)
5. Microsemi Corporation, MMA034AA; MMA035AA; MMA036AA, MMIC Selection Guide, Product Datasheet. URL: <http://www.microsemi.com/products/mmic/low-noise-amplifiers> (дата обращения 01.05.2016)
6. Analog Devices, Inc., HMC-ALH382, GaAs HEMT LOW NOISE, Product Datasheet. URL: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/rf-amplifiers/hmc-alh382-die.html> (дата обращения 01.05.2016)
7. RF-LAMBDA, R50G69GSA, Low Noise Amplifier 50-69GHz NF:3.8dB, Product Datasheet. URL: http://www.rflambda.com/product_list.jsp?catalog=67 (дата обращения 01.05.2016)
8. RF-LAMBDA, R50G69GSB, Low Noise Amplifier 50-69GHz, Product Datasheet. URL: http://www.rflambda.com/product_list.jsp?catalog=67 (дата обращения 01.05.2016)
9. RF-LAMBDA, R50G69GSC, Low Noise Amplifier 50-69GHz NF:3.8dB, Product Datasheet. URL: http://www.rflambda.com/product_list.jsp?catalog=67 (дата обращения 01.05.2016)
10. Ducommun Incorporated, ALN-61086015; ALN-61086030, Low Noise Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.ducommun.com/engineeredolutions/millimeterwave/amplifiers.aspx> (дата обращения 01.05.2016)
11. Мальцев П.П., Матвеев О.С., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Зуев А.В., Бунегина С.Л. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2014. № 4 (108). С. 73–76.
12. Крапухин Д.В., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Зуев А.В. Моделирование и проектирование монолитной интегральной схемы маломощного усилителя со встроенной антенной для диапазона 57–64 ГГц // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2015. Т. 15. № 4. С. 49–52.
13. Федоров Ю.В., Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Путинцев Б.Г., Павлов А.Ю., Зуев А.В. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44–51.
14. Федоров Ю.В., Михайлович С.В. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN HEMT // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 12–17.
15. Галиев Р.Р., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Майтама М.В., Матвеев О.С., Михайлович С.В., Федоров Ю.В., Щербакова М.Ю. Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21–32.