

На пути к созданию отечественных приемопередающих модулей V-диапазона на гетероструктурах нитрида галлия

Д.Л. Гнатюк

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН

Аннотация: в данной работе представлены результаты по разработке отечественной элементной базы для создания приемопередающих модулей диапазона частот 57 – 64 ГГц на основе гетероструктур нитрида галлия на подложках сапфира. Созданы макеты приемного, передающего и приемопередающего устройства со встроенными антеннами и исследованы их характеристики. Дана оценка полученных результатов в сравнении с мировыми достижениями.

Ключевые слова: приемопередающий модуль, нитрид галлия, сапфир, V-диапазон, МИС

1. Введение

В настоящее время в мире наблюдается повышенный интерес к диапазону частот 57 – 64 ГГц (V-диапазон). Являясь свободным широкополосным ресурсом, данный диапазон привлекателен для построения сетей связи стандарта 5G и может обеспечить передачу данных со скоростью до 5 Гбит/с. Более того, сильное поглощение электромагнитных волн атмосферным кислородом устраняет проблему интерференции между источниками сигнала, принадлежащими разным сетям, при организации персональных сетей. Это также позволяет создавать каналы спутниковой связи, защищенные от помех с Земли. Малый размер длины волны в V-диапазоне позволяет интегрировать на кристалл как отдельные антенны, так и антенные решетки.

На сегодняшний день за рубежом уже имеются коммерчески доступные образцы приемопередающих систем не только V-диапазона, но и на частоты вплоть до 81 – 86 ГГц, позволяющие работать с различными типами модуляции. Например, передающий и приемный модули Analog Devices HMC6300 и HMC6301 или приемопередающие модули Infineon BGT60, BGT70, BGT80 [1-3].

В 2015 году ИСВЧПЭ РАН успешно завершил Государственный контракт на выполнение ОКР «Разработка комплекта монолитных интегральных схем 5 мм диапазона длин волн». В ходе ОКР впервые в России был разработан, изготовлен и испытан комплект монолитных интегральных схем (МИС) для приемопередающих модулей V-диапазона на нитрид-галлиевых гетероструктурах на сапфировой подложке производства ЗАО «Элма-Малахит». В состав комплекта вошли генератор, управляемый напряжением (ГУН), балансный смеситель, усилитель миллиметрового диапазона, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), антенный элемент, а также приемный и приемопередающий преобразователи сигнала. Насколько нам известно, преобразователи сигнала V-диапазона на гетероструктурах нитрида галлия на сапфире были изготовлены впервые в мире. За рубежом работы по созданию приемопередающих модулей (ППМ) V-диапазона выполняются на основе таких материалов как Si, SiGe, GaAs [4].

МИС усилителя миллиметрового диапазона частот в зависимости от рабочей точки может служить в качестве маломощного усилителя (МШУ) и усилителя мощности (УМ). В малосигнальном режиме коэффициент передачи составляет не менее 15 дБ при коэффициенте шума около 6 дБ и токе потребления менее 100 мА. В

режиме большого сигнала в импульсном режиме по питанию выходная мощность достигает 100 мВт при токе потребления до 200 мА. Линейная выходная мощность составляет 30 - 50 мВт. Выходная мощность МИС ГУН в непрерывном режиме составляет 30 – 40 мВт при напряжении питания 10 В. Линейный диапазон перестроения частоты – не менее 2 ГГц. Приемный и приемно-передающий преобразователи сигнала имеют коэффициент преобразования не менее плюс 10 дБ при напряжении питания 10 В и токе потребления менее 150 мА. Выходная мощность передающего канала составляет не менее 10 мВт в непрерывном режиме.

По результатам выполнения ОКР было оформлено 5 свидетельств о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы [5-9] и утверждены ТУ на следующие монолитные интегральные схемы [10]:

- малошумящий усилитель без антенны 5411УВ01Н и интегрированный с антенной на одном кристалле 5411УВ01АН (АЕНВ.431130.293ТУ);
- усилитель мощности без антенны 5411УВ02Н и интегрированный с антенной на одном кристалле 5411УВ02АН (АЕНВ.431120.294ТУ);
- преобразователь сигнала 5411НС01Н (АЕНВ. 431320.295ТУ).

2. Макеты приемно-передающих устройств и их характеристики

Для отработки конструкторских и технологических решений по созданию и сборке ППМ на основе полученных МИС были разработаны макеты приемного и передающего устройств. Макеты выполнены на печатной плате из материала Rogers 4350 размером 24 x 26 мм и представляют собой гибридные сборки, содержащие бескорпусные МИС, согласующие элементы и разъемы. В состав передающего устройства входят МИС антенного элемента и МИС ГУН. В состав приемного устройства входят МИС антенного элемента и МИС приемного преобразователя сигнала в составе ГУН, смеситель, УПЧ. Кристаллы монтируются на платы методом приклейки и разварки.

При исследовании передающего устройства для приема излучаемого гармонического сигнала использовалась рупорная лабораторная антенна, подключенная ко входу векторного анализатора цепей. Линейный участок диапазона перестроения ГУН составил более 2 ГГц. По сравнению с измерением параметров МИС ГУН до монтажа начальная частота генерации уменьшилась примерно на 1 ГГц (рисунок 1). Эффективная изотропно излучаемая мощность составила 14 дБм.

При исследовании приемного устройства гармонический СВЧ сигнал V-диапазона поступал с лабораторного генератора через рупорную антенну, а преобразованный сигнал с выхода ПЧ макета поступал на анализатор спектра. Контролировалось наличие сигнала ПЧ на выходе приемного устройства и его зависимость от частоты входного СВЧ сигнала, и напряжения, подаваемого на вход управления ГУН.

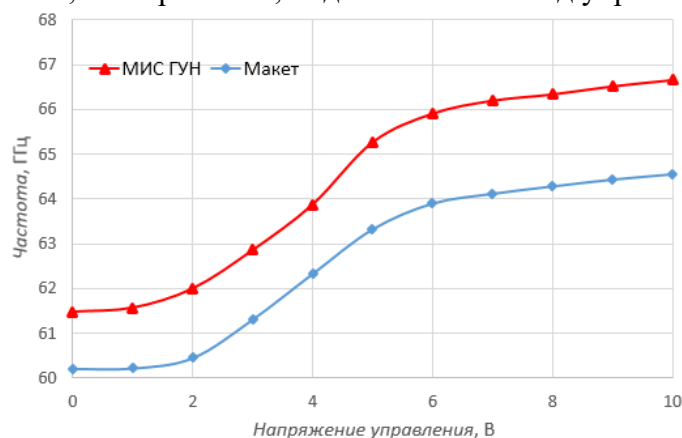


Рисунок 1. Зависимость частоты генерации МИС ГУН до монтажа и макета передающего устройства от напряжения управления.

После подтверждения работоспособности устройств они были протестированы совместно, имитируя радиолинию связи, а именно: сигнал с макета передающего устройства принимался макетом приемного устройства. Сигнал с выхода ПЧ приемного устройства поступал на анализатор спектра. В лабораторных условиях протяженность радиолинии была ограничена 120 сантиметрами. При этом анализатор спектра детектировал сигнал с мощностью минус 54 дБм (рисунок 3). Было также проконтролировано влияние напряжения управления ГУН обоих макетов на частоту выходного сигнала ПЧ.

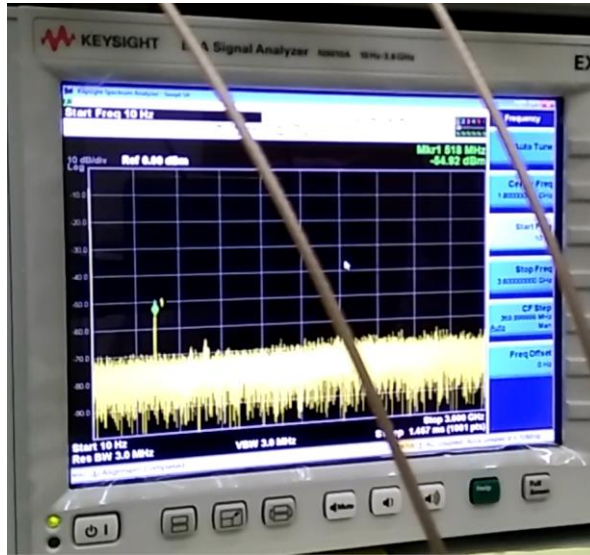


Рисунок 2. Сигнал на выходе ПЧ во время тестирования макетов в режиме имитации радиолинии связи.

Дальнейшим развитием данной работы стало объединение на одном кристалле преобразователя сигнала вместе с приемной и передающей антеннами. Преобразователь сигнала состоит из ГУН, балансного смесителя и МШУ на входе ВЧ. Присутствовавший ранее в конструкции УПЧ был упразднен. При проектировании были использованы успешно проявившие себя топологические решения составных частей преобразователя сигнала. Результатом данной работы стали МИС, показанные на рисунке 3 [11].

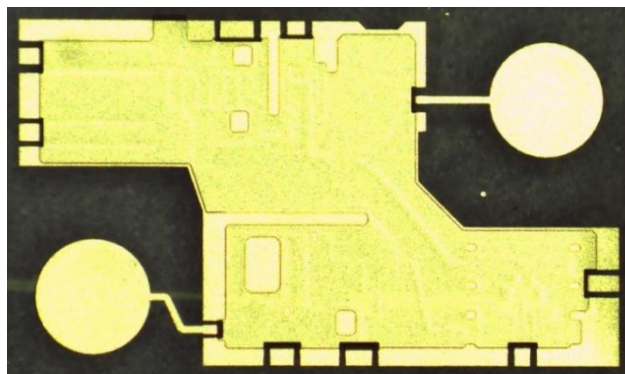


Рисунок 3. Фотография приемо-передающего преобразователя со встроенными антеннами.

Данные МИС были опробованы в составе макетов однокристалльных приемо-передающих устройств V-диапазона, показанных на рисунке 4. Поскольку схемотехнически и топологически приемо-передающий преобразователь сигнала аналогичен микросхемам 5411НС01Н и 5411УВ01Н, то они обладают близкими

рабочими характеристиками. Диапазон линейного участка перестроения ГУН составляет не менее 1,5 ГГц. Эффективная изотропно излучаемая мощность достигает 12 дБм. Коэффициент преобразования составляет минус 15 дБ (за счет упразднения УПЧ). Мощность выходного сигнала может быть увеличена за счет дополнительного подключения внешнего УПЧ к выходу ПЧ макета.

Исследованные макеты имеют значения выходной и потребляемой мощности на уровне мировых коммерческих разработок (таблица 1).

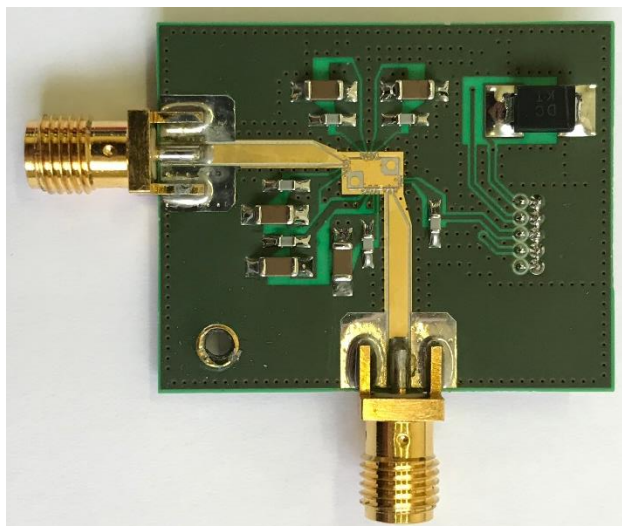


Рисунок 4. Фотография макета однокристального приемо-передающего устройства.

Таблица 1. Сравнение параметров приемо-передающих устройств

	ИСВЧПЭ РАН Передающий макет	ИСВЧПЭ РАН Приемо- передающий макет	Analog Devices HMC6300	Infineon Technologies BGT60
Материал	GaN НЕМТ	GaN НЕМТ	-	SiGe БиКМОП
Выходная мощность (дБм)	14	12	14	14
Потребляемая мощность (Вт)	< 0,6	< 1,5	< 1	< 1,6

3. Заключение

Впервые в мире продемонстрированы макеты приемного, передающего и приемо-передающего устройства со встроенными антеннами на гетероструктурах нитрида галлия на сапфировых подложках. Зафиксирована величина эффективной изотропно излучаемой мощности на уровне 12 – 14 дБм. Показана работоспособность и перспективность применения разработанных МИС в качестве элементной базы для создания отечественных приемо-передающих модулей диапазона частот 57 – 64 ГГц.

Заложенные конструктивные решения могут послужить основой для разработок приемо-передающих модулей в диапазоне 90 ГГц. В данном диапазоне частот ИСВЧПЭ РАН уже имеет задел – разработка МИС усилителей с величиной насыщенной мощности 100 мВт [12 - 13].

Список литературы

1. 60 GHz Millimeterwave Transmitter, 57 GHz to 64 GHz, Data Sheet HMC6300 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC6300.pdf>, свободный (дата обращения: 26.03.2019).
2. 60 GHz Millimeterwave Receiver, 57 GHz to 64 GHz, Data Sheet HMC6301 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC6301.pdf>, свободный (дата обращения: 26.03.2019).
3. Шахнович, И. Компания Infineon technologies от сенсоров до решений для опорных сетей в E- и V-диапазонах // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2016. — №5 (00155). — С. 70 — 75.
4. Системы на кристалле со встроенными антеннами на наногетероструктурах A^3B^5 / ред. П.П. Мальцев. - Москва: Техносфера, 2018. – 528 с.
5. Топология ИМС «Преобразователь сигнала для диапазона 57-64 ГГц» // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630171 от 05.12.2013 г. / Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Зуев А.В.
6. Топология ИМС «Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 57-64 ГГц» // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630159 от 06.11.2013 г. / Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Зуев А.В.
7. Топология ИМС «Смеситель на балунах Маршанда для диапазона 60 ГГц» // Свидетельство о государственной регистрации № 2014630051 от 19.02.2014 г. / Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С.
8. Топология ИМС «Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 57-64 ГГц» // Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 02.12.2015 г. / П.П. Мальцев, Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Зуев А.В.
9. Топология ИМС «Интегрированный приемо-передающий модуль для диапазона частот 57-64 ГГц» // Свидетельство о государственной регистрации № 2016630080 от 12.07.2016 г. / Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Крапухин Д.В., Путинцев Б.Г.
10. Справочный лист комплекта бескорпусных МИС серии 5411 на нитриде галлия для диапазона частот 57-64 ГГц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new.isvch.ru/razrab/>, свободный (дата обращения: 27.03.2019).
11. Путинцев, Б. Разработка однокристалльных приемопередающих модулей V-диапазона на нитриде галлия // Нано – и микросистемная техника. — 2017. — №12. — С. 729 — 734.
12. Топология ИМС «Трехкаскадный усилитель мощности W-диапазона» // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630035 от 19.02.2013 г. / Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Кузнецова Т.И., Майтама М.В., Галиев Р.Р.
13. Топология ИМС «Двухкаскадный малошумящий усилитель W-диапазона» // Свидетельство о государственной регистрации № 2014630155 от 19.12.2014 г. / Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Галиев Р.Р.