———— ПРИБОРЫ ——

УДК 621.38.049.77

МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИИ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ И СРЕДСТВ СВЯЗИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 22–25 ГГц

© 2022 г. О. С. Матвеенко^{*a*, *}, Д. Л. Гнатюк^{*a*}, А. С. Бугаев^{*a*}, А. Ю. Павлов^{*a*}, С. А. Гамкрелидзе^{*a*}, Р. Р. Галиев^{*a*}, А. В. Зуев^{*a*}, Ю. В. Федоров^{*a*}, Д. В. Лаврухин^{*a*}, А. О. Михалев^{*a*, *b*}. Н. К. Зенченко^{*a*, *b*}

> ^аФедеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской АН (ИСВЧПЭ РАН), Нагорный проезд, д. 7, стр. 5, Москва, 117105 Россия

^bФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА – Российский технологический университет" (РТУ МИРЭА), пр. Вернадского, 78, Москва, 119454 Россия

> **E-mail: unicfive@yandex.ru* Поступила в редакцию 03.09.2021 г. После доработки 15.11.2021 г.

Принята к публикации 28.12.2021 г.

В ИСВЧПЭ РАН разработан, изготовлен и исследован комплект монолитных интегральных схем (**МИС**) диапазона 22–25 ГГц на основе наногетероструктур нитрида галлия на подложках сапфира. На базе изготовленных МИС собраны макеты приемо-передающих трактов радиолокационных станций ближнего действия (до 10 м) и каналов связи. Приведены результаты измерения СВЧ характеристик макетов приемо-передающих трактов. Установлена возможность использования разработанных МИС в каналах связи с цифровой и аналоговой модуляцией.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, наногетероструктура нитрида галлия, подложка сапфира, приемо-передающий тракт, малошумящий усилитель, смеситель, усилитель мощности, генератор, управляемый напряжением

DOI: 10.31857/S0544126922030085

1. ВВЕДЕНИЕ

Общая мировая тенденция показала, что нитрид галлия был выбран как основной материал для создания следующего поколения радиолокационной аппаратуры и ее компонентов. Основной причиной этому явились большая ширина запрещенной зоны нитрида галлия по сравнению с арсенидом галлия и кремнием, а соответственно и большие пробивные напряжения, работоспособность в области высоких температур, высокие удельные мощности, стойкость к воздействию внешних и специальных факторов. Успехи в решении вопросов технологического характера, обеспечившие функциональные параметры, надежность и экономическую целесообразность применения транзисторов и монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия [1, 2] оказали решающее значение в дальнейшем развитии данного направления электроники.

В последнее время идет активное развитие радиолокационных станций (РЛС) ближнего действия как для автомобильных радаров (24–26, 76–77 ГГц), так и для применения в робототехнике.

В настоящей статье приведены результаты работы ИСВЧПЭ РАН по созданию МИС на основе наногетероструктур нитрида галлия и сборке на их основе макетов приемо-передающих трактов (ППТ) радиолокационных станций ближнего действия (до 10 м) в диапазоне частот 22–25 ГГц.

2. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ GaNHEMT

Изготовление монолитных интегральных схем в ИСВЧПЭ РАН осуществляется по базовой технологии, исходными структурами для которой являются любые типы гетероструктур на основе нитридов элементов третьей группы с квазидвумерным электронным газом (НЕМТ-структуры), выращенные на подложках сапфира или карбида кремния. Базовая технология обеспечивает для транзисторов предельную частоту усиления по току $F_t \sim 60$ ГГц и предельную частоту усиления по мощности $F_{\text{max}} > 120-150$ ГГц при заданной (относительно частотных требований GaNHEMT) оптимальной длине затвора 0.18 мкм.

В данной работе в ИСВЧПЭ РАН для изготовления GaNHEMT были использованы наногетероструктуры нитрида галлия на подложках сапфира отечественного производства с толщиной барьерного слоя 13.7 нм, предприятие изготовитель – ЗАО "Элма-Малахит" (г. Москва, Зеленоград).

При запуске рабочей пластины с гетероструктурой формируется межприборная изоляция за счет плазмохимического травления активных слоев на глубину порядка 100 нм. После изоляции идет этап формирования несплавых омических контактов за счет доращивания сильнолегированного GaN через диэлектрическую маску, с последующем осаждением металлизации на сильнолегированный GaN. Все технологические операции, кроме роста сильнолегированного GaN, проводятся на оборудовании ИСВЧПЭ РАН. Рост GaN осуществляется в НИЦ "Курчатовский институт" [3-6]. Затем в местах формирования грибообразных затворов делается "рецесс", небольшое заглубление в барьерный слой гетероструктуры по разработанному в ИСВЧПЭ РАН способу плазмохимического "сухого" травления AlGaN [7, 8]. Такое травление реализовано как двухстадийный процесс: окисление полупроводника и удаление его окисла. Процесс является контролируемым, так как за один цикл такого травления снимается конкретная толщина полупроводника. Для гетероструктуры AlGaN/GaN для окисления используется кислородная среда, а для снятия окисленного барьерного слоя AlGaN хлорсодержащая среда. Такое последовательное удаление окисленных слоев обеспечивает заглубление со скоростью 1.5-2.5 нм за цикл. Для осуществления процесса травления барьерного слоя AlGaN формируется жесткая маска из диэлектрической пленки, через которую осуществляется окисление и последующее снятие окисленного слоя AlGaN. После выполнения необходимого количества циклов, снимается пленка диэлектрика, осаждается тонкая пленка пассивирующего диэлектрика и формируется затвор транзистора.

Технология "рецесса" позволяет перейти к питанию от одного источника питания положительного напряжения, а затворы транзисторов соединить с земляной шиной. Межэлектрические соединения формируются за счет использования технологии "воздушных мостов".

Для работы в классическом режиме усиления класса A, без проявления коротко-канальных эффектов, транзисторы должны иметь аспектное соотношение длины затвора к толщине барьерно-го слоя $L_g/t_{\text{bar}} > 10-15$ [9]. Для использованных AlGaN/AlN/GaN наногетероструктур была выбрана длина затворов транзисторов 0.18 мкм, что

обеспечило аспектное соотношение более 20 при условии формирования подзатворного "рецесса" с заглублением на 5–6 нм.

3. ОПИСАНИЕ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

На основе описанной технологии в ИСВЧПЭ РАН были разработаны, изготовлены и исследованы МИС генератора, управляемого напряжением (ГУН) и приемо-передающего кристалла (ППК). Оба кристалла реализованы в копланарном исполнении, что позволяет избежать травления отверстий в подложке. Это особенно актуально при работе с подложками сапфира, поскольку травление отверстий в сапфире является технологически сложной задачей.

Фотография изготовленной МИС ГУН показана на рис. 1. Размер кристалла: 1.9 × 1.6 мм². ГУН реализован по схеме индуктивной трехточки на GaN HEMT транзисторе с шириной затворов 4 × 100 мкм. Перестройка частоты генерации осуществляется с помощью варактора, представляющего собой HEMT транзистор в диодном включении. Емкость варактора регулируется подаваемым на него напряжением управления.

МИС ППК имеет в своем составе малошумящий усилитель (**MШУ**) входного ВЧ сигнала, балансный резистивный смеситель на основе моста Маршанда, усилитель мощности (**УМ**) сигнала внешнего гетеродина с делителем. Усиленный сигнал гетеродина разделяется между входом смесителя и выходом ВЧ. На выходе смесителя формируется сигнал на разностной частоте. МШУ и УМ реализованы на НЕМТ транзисторах в каскадном включении с шириной затворов 2 × 130 и 2 × 100 мкм соответственно. Фотография изготовленной МИС ППК показана на рис. 2. Размер кристалла: 2.8 × 1.6 мм².

В процессе разработки МИС были получены РИД на топологии интегральных микросхем [10, 11].

Исследования параметров кристаллов на зондовой станции продемонстрировали следующие основные характеристики:

– для МИС ГУН: диапазон перестроения в пределах 21–23.5 ГГц при изменении напряжения управления до 5 В, выходная мощность 17–21 дБм, напряжение питания 8–10 В, ток потребления 80–90 мА;

– для МИС ППК: коэффициент передачи "минус" 3 – "плюс" 1 дБ, мощность выходного сигнала более 15–18 дБм при мощности на входе гетеродина 8–12 дБм, напряжение питания 8–10 В, ток потребления 80–100 мА.



Рис. 1. Фотография кристалла ГУН.



Рис. 2. Фотография кристалла ППК.

4. ОПИСАНИЕ МАКЕТОВ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ

На основе полученных МИС были собраны макеты экспериментальных образцов приемопередающих трактов (ППТ) методом перевернутого монтажа (flip-chip) на алюмооксидных платах с глубиной прокисления 50 мкм, изготовленных в АО "НИИ ТП". Монтаж осуществлялся в АО "ЗИТЦ". Функциональная схема двухкристального ППТ представлена на рис. 3. ППТ состоит из кристаллов ГУН и ППК, установленных

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 51 № 3 2022

на плату, с ВЧ входом и выходом на антенны, и выходом промежуточной частоты. Фотография алюмооксидной платы с установленными на ней кристаллами представлена на рис. 4*a*.

Для проведения измерений на алюмооксидную плату устанавливаются съемные CBЧ разъемы типа "end launch" для входного и выходного ВЧ сигналов, а также контактное устройство с прижимными контактами, обеспечивающее подачу напряжений питания и снятие выходного сигнала промежуточной частоты через миниатюрный CBЧ



Рис. 3. Функциональная схема двухкристального приемо-передающего тракта, состоящего из МИС ГУН и МИС ППК.



(б)



Рис. 4. Алюмооксидная плата с установленными кристаллами – *a*; макет ППТ в измерительной оснастке – *б*.

разъем. Внешний вид макета в описанной измерительной оснастке показан на рис. 46.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТОВ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ

Для экспериментальных исследований были собраны макеты ППТ в количестве 5 шт. Диапазон перестроения ГУН макетов ППТ составил от 0.5 до 2 ГГц. Частота выходного ВЧ сигнала макетов лежит в пределах 22–25 ГГц при изменении напряжения управления от 0 до 5 В. На рис. 5 представлена зависимость выходной частоты ВЧ сигнала от напряжения управления для значений напряжения питания 9, 10 и 11 В для одного из макетов с максимальным диапазоном перестроения. Изменение частоты выходного сигна-



Рис. 5. Зависимость выходной частоты от напряжения управления макета ППТ при напряжениях питания 9, 10 и 11 В.

ла при изменении напряжения питания не более 50 МГц/В, крутизна перестройки частоты 400 МГц/В. На рис. 6 представлены частотные зависимости мощности выходного сигнала и коэффициента преобразования макетов ППТ при частоте входного ВЧ сигнала 23 ГГц. При напряжении управления 0 В значения выходной мощности пяти макетов ППТ лежат в пределах 12-15.5 дБм, а коэффициента преобразования – "минус" 0.6 – "минус" 7.4 дБ. Разброс значений выходной мощности макетов соответствует разбросу мощности кристаллов ГУН до монтажа. В то же время разброс значений коэффициента преобразования макетов составил более 6 дБ, тогда как разброс данного параметра отдельных МИС ППК до монтажа находился в пределах 4.0 дБ. Это объясняется значительным ухудшением коэффициента преобразования одного из образцов (нижняя зависимость на рис. 6). Разброс коэффициента преобразования остальных макетов в результате монтажа не изменился. Это свидетельствует о достаточно высоком качестве и воспроизводимости процесса flip-chip монтажа. Типовая зависимость выходной мощности макета ППТ от напряжения управления при напряжениях питания от 5 до 10 В показана на рис. 7. Макеты ППТ работоспособны при снижении напряжения питания вплоть до 5 В с ухудшением параметров. Спектральная плотность фазовых шумов передающего канала на отстройке 100 КГц составляет -65...-70 дБн/Гц. Макеты ППТ имеют общий ток потребления 190-200 мА при напряжении питания 10 В. Напряжение питания отрицательной полярности отсутствует.

Макеты ППТ были проверены в радиолокационном режиме с имитацией принимаемого сигнала от препятствия в НИУ МИЭТ. Несмотря на относительно высокую спектральную плотность фазовых шумов макетов ППТ, во всех образцах оказалось возможным выделить сигнал от препятствия при нормальном (перпендикулярном) направлении к поверхности на расстояниях от 5 до 10 м. Такое расстояние может быть достаточным в ряде областей применения, например, для создания роботизированных манипуляторов, работающих в условиях повышенной радиации или других экстремальных условиях среды.

В связи с относительно высокой спектральной плотностью фазовых шумов макеты ППТ с МИС ГУН не пригодны для реализации канала связи с цифровой модуляцией. Однако была установлена возможность их применения с аналоговой модуляцией. Для сигнала с шириной полосы 200 МГц (1000 тонов с шагом 200 кГц) максимальное отклонение по фазе составило 6 градусов, по амплитуде – 0.8 дБ.

Дополнительно было проведено исследование отдельно МИС ППК в режиме цифровой модуля-



Рис. 6. Зависимость выходной мощности ВЧ сигнала (сверху) и коэффициента преобразования (снизу) от напряжения управления макетов ППТ.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 51 № 3 2022



Рис. 7. Типовая зависимость выходной мощности ВЧ сигнала от напряжения управления при различных напряжениях питания макета ППТ.



Рис. 8. Модуляция с символьной скоростью 300 М символ/с ППК на плате.

ции. Для этого кристалл монтировался на печатную плату Роджерс методом приклейки и разварки. Полученный образец был исследован при цифровой квадратурной амплитудной модуляциис 16 комбинациями (16QAM). При символьной скорости 300 Мсимвол/с (1.2 Гбит/с) на частоте ВЧ 24 ГГц и частоте гетеродина 23 ГГц величина вектора ошибки (EVM) составила 3.8% гms. При этом EVM измерительной системы (при подключении векторного генератора непосредственно на вход анализатора сигналов) составил 3.5% мс. Скриншот созвездия показан на рис. 8. Полученные данные свидетельствуют о том, что МИС ППК может применяться для обработки сигналов с различными видами цифровой модуляции.

Изготовленные кристаллы ГУН и ППК выдержали испытания на воздействие факторов космического пространства: тяжелых заряженных частиц и нейтронов, проведенные НИЯУ МИФИ, без потери работоспособности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВИСВЧПЭ РАН разработан, изготовлен и исследован комплект МИС на основе наногетероструктур нитрида галлия на подложках сапфира отечественного производства, а также собраны и исследованы макеты приемо-передающих трактов. Установлено, что возможно применение МИС в системах ближней радиолокации до 10 м. Макеты ППТ пригодны для использования в каналах связи с аналоговой модуляцией, а МИС ППК – и с цифровой модуляцией. МИС на нитриде галлия обладают устойчивостью к воздействию радиации и перспективны для применения в экстремальной робототехнике и малых космических аппаратах. МИС ППК заменяет 3 функциональные микросхемы: смеситель, МШУ и УМ. Насколько известно авторам, МИС с такой степенью интеграции на нитриде галлия изготовлены впервые в России.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о предоставлении

субсидии № 14.607.21.0124, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0124).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices and Technology / F. Medjdoub, K. Iniewski // CRC Press. 2016. P. 372.
- High Performance Transmitters for Small Satellites for Data Transmission and Remote Sensing / N. Deo // 2019 IEEE Aerospace Conference. – Big Sky, MT, USA. 2019. P. 1–6.
- 3. Арутюнян С.С., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю. и др. Двухслойная диэлектрическая маска Si₃N₄/SiO₂ для создания низкоомных омических контактов к AlGaN/GaN HEMT // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 8. С. 1138–1142.
- 4. Павлов В.Ю., Павлов А.Ю. Технологии формирования сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN. Обзор // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 10. С. 635–644.
- 5. Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н и др. Несплавные омические контакты для транзисторов с высокой подвижностью электронов на гетероструктурах AlGaN/GaN // Микроэлектроника. 2017. Т. 46. № 5. С. 340–347.

- 6. Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н. Термическая стабильность несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 22. С. 96–103.
- 7. Михайлович С.В., Павлов А.Ю., Томош К.Н. и др. Низкоэнергетическое бездефектное сухое травление барьерного слоя HEMT AlGaN/AlN/GaN // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 10. С. 61–67.
- 8. Павлов А.Ю. Технология изготовления транзисторов с обеднением и обогащением канала на нитриде галлия // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2019. № 2(174). С. 64–71.
- 9. *Федоров Ю.В., Михайлович С.В.* Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 4. С. 217–226.
- Федоров Ю.В., Матвеенко О.С. Топология ИМС "Приемо-передающий модуль для диапазона частот 23–25 ГГц в составе: ГУН с буферным усилителем, Свидетельство о государственной регистрации 2017630076 от 04.04.2017.
- 11. Федоров Ю.В. Топология ИМС "Приемо-передающий модуль для диапазона частот 23–25 ГГц в составе: малошумящий усилитель, балансный смеситель, умножитель частоты", свидетельство о государственной регистрации № 2017630091 от 30.05.2017.