——— ПРИБОРЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ——

УДК 530.145

# МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ Кu И Кa ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА ПОДЛОЖКАХ КРЕМНИЯ

© 2021 г. Ю. В. Федоров<sup>а,</sup> \*, А. С. Бугаев<sup>а</sup>, С. А. Гамкрелидзе<sup>а</sup>, Д. Л. Гнатюк<sup>а,</sup> \*\*, О. С. Матвеенко<sup>а</sup>, А. Ю. Павлов<sup>а</sup>, Р. Р. Галиев<sup>а</sup>, А. В. Зуев<sup>а</sup>, М. В. Майтама<sup>а</sup>, Н. В. Щаврук<sup>а</sup>, К. Н. Томош<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской АН (ИСВЧПЭ РАН), Нагорный проезд, 7, Москва, 117105 Россия

\**E-mail: iuhfseras2010@yandex.ru* \*\**E-mail: dgnatyuk@yandex.ru* Поступила в редакцию 03.05.2020 г. После доработки 23.11.2020 г. Принята к публикации 23.11.2020 г.

Впервые в России в ИСВЧПЭ РАН разработаны, изготовлены и исследованы три типа монолитных интегральных схем Ки и Ка диапазонов длин волн на основе гетероструктур нитрида галлия на подложках кремния диаметром 100 мм. Приведены результаты измерения СВЧ характеристик полученных микросхем.

*Ключевые слова:* монолитная интегральная схема, гетероструктура GaN, кремний, Ки-диапазон, Ка-диапазон, малошумящий усилитель, генератор управляемый напряжением, преобразователь сигнала **DOI:** 10.31857/S0544126921030042

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Ведущими европейскими организациями в аэрокосмической отрасли нитрид галлия был выбран как основной материал для создания следуюшего поколения радиолокационной аппаратуры и ее компонентов. Причиной этому явились, с одной стороны, 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, и с другой стороны, успехи в решении вопросов технологического характера, обеспечившие функциональные параметры, надежность и экономическую целесообразность применения транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитрида галлия [1-3].

Для роста гетероструктур нитрида галлия используются подложки сапфира, кремния и карбида кремния (см. табл. 1). Поскольку для приборов с высокой удельной мощностью необходимо обеспечить хороший теплоотвод, наиболее предпочтительными являются подложки карбида кремния, имеющие теплопроводность на порядок выше, чем у сапфира и примерно в 3 раза выше, чем у кремния. Карбид кремния также наиболее согласован с нитридом галлия по параметру кристаллической решетки и коэффициенту теплового расширения. Однако подложки кремния экономически более выгодны: их стоимость на порядок ниже стоимости подложек карбида кремния при большей доступной площади подложки. При высоких температурах теплопроводность кремния всего в два раза ниже теплопроводности карбида кремния. Обработка подложек кремния (шлифовка, травление сквозных отверстий) намного проще и быстрее, чем для карбида кремния. Поэтому подложки кремния находят применение для решения широкого круга задач, не требующих достижения предельных параметров по максимальной удельной мощности, особенно для миллиметрового диапазона частот.

В настоящей статье приведены результаты работы ИСВЧПЭ РАН по созданию ряда МИС сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на основе гетероструктур нитрида галлия на подложках кремния диаметром 100 мм. Насколько известно авторам, подобные МИС были изготовлены впервые в России.

### МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

	Si	Сапфир	SiC		
Ширина запрещенной зоны, (эВ)	1.11	9.9	3.26		
Теплопроводность при 300 K, (Вт/см · K)	1.5	0.35	4.9		
Рассогласование параметра кристаллической решетки по сравнению с GaN, (%)	17	14	3.5		
Коэффициент теплового расширения, (×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	2.6	7.5	4.46		
Отличие коэффициента теплового расширения по сравнению с GaN, (%)	52.7	36.4	18.9		
Доступный размер подложки, (мм)	300	150	150		
Стоимость подложки	Очень низкая	Средняя	Высокая		

Таблица 1.	Свойства подложек для рос	га гетероструктур нитрида галлия	[2]	
------------	---------------------------	----------------------------------	-----	--

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ GaN-HEMT

Изготовление монолитных интегральных схем в ИСВЧПЭ РАН осуществляется по базовой технологии [4], исходными структурами для которой являются любые типы гетероструктур на основе нитридов элементов третьей группы с квазидвумерным электронным газом (НЕМТ-структуры), выращенные на подложках сапфира, карбида кремния, высокоомного кремния. Базовая технология обеспечивает для транзисторов предельную частоту усиления по току  $F_t = 60-100$  ГГц и предельную частоту усиления по мощности  $F_{\text{max}} > 120-200$  ГГц при заданной (относительно частотных требований МИС) оптимальной длине затвора ~0.16-0.08 мкм.

При изготовлении в микрополосковом варианте на кремниевой подложке толщина утоненной подложки составляла 50 мкм при диаметре сквозных отверстий 50-80 мкм. Использовалась совмещенная технология формирования сквозных отверстий и разделения готовой пластины на кристаллы без использования механической резки. Для этого перед напылением слоя первого металла в хлорсодержащей плазме вытравливаются все слои AlN и GaN как в местах будущих сквозных отверстий, так и по дорожкам реза границ кристаллов с небольшим заглублением в кремниевую подложку. После завершения всех технологических операций на лицевой части пластины и ее утонения до 50 мкм во фторсодержащей плазме вытравливаются отверстия в кремниевой подложке до металла. После напыления металла на обратную сторону и нанесения сплошного слоя гальванического золота толщиной ~6 мкм в металле вытравливаются дорожки реза. Далее, используя гальваническое золото в качестве маски, во фторсодержащей плазме вытравливаются дорожки реза по границам кристаллов. После растворения клея, используемого для приклеивания подложки к носителю перед утонением, получаются готовые кристаллы GaN-HEMT МИС.

# ОПИСАНИЕ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

На основе гетероструктур AlN/GaN на подложках кремния в ИСВЧПЭ РАН были разработаны, изготовлены и исследованы три типа монолитных интегральных схем:

• малошумящий усилитель (МШУ) и генератор управляемый напряжением (ГУН) Ка-диапазона изготовлены в микрополосковом варианте с заземляющими сквозными отверстиями;

• приемо-передающий преобразователь сигнала Ки-диапазона изготовлен в копланарном варианте.

Микросхемы изготавливались в инициативном порядке для отработки технологических вопросов и оценки достижимых параметров по сравнению с ранее разработанными МИС аналогичного функционального назначения и частотного диапазона на подложках сапфира [5–7].

Для изготовления МИС МШУ и МИС ГУН была выбрана длина грибообразного затвора  $L_g =$ = 0.12 мкм, обеспечивающая  $F_t = 70$  ГГц и  $F_{max} =$ = 120 ГГц в геометрии транзистора с шириной 2 × × 50 мкм. Для МИС преобразователя сигнала Кидиапазона  $L_g = 0.16$  мкм,  $F_t = 60$  ГГц,  $F_{max} = 125$  ГГц.

В данной работе были использованы зарубежные подложки высокоомного кремния диаметром 100 мм с выращенной на них гетероструктурой AlN/GaN.

МШУ Ка-диапазона имеет пять усилительных каскадов с транзисторами с шириной затворов 2 × 40 мкм, включенными по схеме с общим истоком. За счет применения цепей автосмещения МШУ работает от источника однополярного питания. При напряжении питания 5 В ток потребления составляет 80–90 мА. В полосе частот 30– 45 ГГц МШУ имеет коэффициент усиления до



**Рис. 2.** Частотные зависимости S21 (*a*), коэффициента устойчивости (*б*), КСВН по входу (*в*), КСВН по выходу (*г*) десяти образцов МИС МШУ.

25 дБ и является хорошо согласованным по входу и выходу. Коэффициент шума находится в пределах 4.5–6 дБ, достигая минимума на частотах 34– 38 ГГц. Размер кристалла: 1.75 × 1.12 мм<sup>2</sup>. Фотография изготовленной МИС МШУ представлена на рис. 1. Измеренные СВЧ характеристики и коэффициент шума десяти образцов показаны на рис. 2 и рис. 3.



Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента шума десяти образцов МИС МШУ.



Рис. 4. Фотография МИС ГУН.



Рис. 5. Зависимости частоты генерации (а) и выходной мощности (б) МИС ГУН от напряжения управления.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 50 № 3 2021



Рис. 6. Фотография приемо-передающего преобразователя сигнала.



**Рис. 7.** Зависимости выходной мощности (*a*) и коэффициента преобразования (*б*) МИС приемо-передающего преобразователя сигнала.

ГУН Ка-диапазона реализован на GaN HEMT транзисторе с шириной затворов 2 × 50 мкм. Перестройка частоты генерации осуществляется с помощью варактора, представляющего собой HEMT транзистор в диодном включении. Колебательный LC контур генератора образован емкостями затвор-исток транзистора, варактора и индуктивностями микрополосковых линий в цепях затвора, стока и истока транзистора. К выходу ГУН добавлен однокаскадный буферный усилитель, служащий для увеличения выходной мощности и развязки выходного сигнала. Емкость варактора регулируется подаваемым на него напряжением управления.

Фотография изготовленной МИС ГУН показана на рис. 4. На рис. 5 представлены зависимости частоты генерации и выходной мощности МИС ГУН от напряжения управления в диапазоне от 0 до 5 В для двух образцов. При напряжении питания 5 В выходная мощность достигает 14—16 дБм, ток потребления 60 мА. Спектральная плотность мощности фазовых шумов при отстройке 100 кГц составляет минус 65 дБн/Гц. Размер кристалла:  $2.0 \times 1.12 \text{ мм}^2$ .

Фотография МИС приемо-передающего преобразователя сигнала Ки-диапазона представлена на рис. 6. Преобразователь имеет в своем составе усилитель входного ВЧ сигнала, балансный смеситель на основе моста Маршанда, усилитель сигнала внешнего гетеродина. Усиленный сигнал гетеродина разделяется между входом смесителя и выходом ВЧ. На выходе смесителя формируется сигнал на разностной частоте. При напряжении питания 10 В ток потребления составляет 100–120 мА. В диапазоне частот 15–25 ГГц мощность на ВЧ выходе достигает 10–15 дБм при коэффициенте преобразования от минус 5 до плюс 2 дБ (рис. 7). Размер кристалла:  $2.84 \times 1.63$  мм<sup>2</sup>.

#### вывод

Впервые в России на основе гетероструктур нитрида галлия на подложках кремния диаметром 100 мм изготовлены три разновидности монолитных интегральных схем Ки и Ка диапазонов длин волн. Рассмотренные монолитные интегральные схемы, а также заложенные в них схемотехнические и технологические решения могут послужить основой для создания перспективных систем радиолокации и связи.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices and Technology / F. Medjdoub, K. Iniewski // CRC Press. 2016. P. 372.

- Кищинский А.А. Твердотельные СВЧ-усилители на нитриде галлия – состояние и перспективы развития // Материалы XIX Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, Вебер, 2009.
- 4. Фёдоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нанои микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 5. С. 273–293.
- Федоров Ю.В., Матвеенко О.С. Топология ИМС "Генератор управляемы напряжением для диапазона частот 32–36 ГГц", свидетельство о государственной регистрации № 2017630088 от 03.05.2017.
- 6. Федоров Ю.В. Топология ИМС "Малошумящий усилитель для диапазона частот 32–36 ГГц", свидетельство о государственной регистрации № 2017630019 от 04.05.2017.
- 7. *Федоров Ю.В.* Топология ИМС "Двойной балансный смеситель для диапазона частот 32–36 ГГц", свидетельство о государственной регистрации № 2017630085 от 02.05.2017.