

УДК 621.382

Элементная база МИС СВЧ для многоканального многочастотного радиотермометра

¹ Чижиков С. В., ¹ Попов В. В., ² Тихомиров В. Г.,
³ Соловьев Ю. В., ¹ Агандеев Р. В.

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный университет)
ул. 2-я Бауманская, д. 5, Москва, 105005, Российская Федерация
chigikov95@mail.ru

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ул. проф. Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

³ АО «Светлана-Электронприбор»
просп. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Российская Федерация

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Современная медицинская СВЧ диагностическая аппаратура требует применения решений, связанных с компактностью разрабатываемых приборов и высоким быстродействием. Достичь поставленных условий возможно с применением современной полупроводниковой компонентной базы на основе соединений A^3B^5 . В работе представлены конструкции основных элементов управления СВЧ сигнала в составе микроволнового радиотермометра монолитного AlGaIn/GaN/SiC HEMT SPDT транзисторного переключателя и МИС МШУ, разработанного на основе рHEMT гетероструктуры арсенида галлия.

Ключевые слова: радиотермометрия, монолитные интегральные схемы, гетероструктуры.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Элементная база МИС СВЧ для многоканального многочастотного радиотермометра / С. В. Чижиков и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 515—530.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Элементная база МИС СВЧ для многоканального многочастотного радиотермометра / С. В. Чижиков, В. В. Попов, В. Г. Тихомиров и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 515—530.

1. Введение

В последнее время для применения в различных сферах деятельности человека бурно развивается метод микроволновой радиометрии (РТМ-метод), имеющий ряд преимуществ перед традиционными методами диагностики. В стадии внедрения в коммерческую эксплуатацию находится перспективный способ измерения влажности почвогрунтов, основанный на использовании СВЧ-радиометрических датчиков различных диапазонов длин волн. Помимо этого, активно развивается микроволновая радиотермометрия для функционального исследования тканей и органов человека, которая позволяет неинвазивно выявлять в них термонеоднородности, реализовывать раннюю диагностику онкологических заболеваний, а также корректировать процесс лечения по изменению параметров электромагнитного излучения тканей и органов [1—2].

РТМ-метод основан на измерении интенсивности собственного электромагнитного излучения физического тела в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ-диапазоне): измеряя мощность шумового сигнала на выходе антенны, можно получить информацию о температуре объекта. Это свойство нагретых тел используется для измерения усредненной температуры внутренних тканей и обнаружения температурных аномалий (повышенной или пониженной температуры внутренних тканей) [3—5].

Измерение мощности шумового сигнала, поступающего с выхода антенны, происходит в СВЧ-приемниках — радиотермометрах, к которым предъявляется ряд существенных требований. Медицинские радиотермометры должны обладать высокой чувствительностью необходимой для приема и обработки крайне слабых шумовых сигналов мощностью $\approx 10^{-13}$ — 10^{-12} Вт, высокой точностью измерения температуры объекта (допустимая разрешающая способность измерителя температуры составляет 0,1 К). Конструкция должна обладать миниатюрностью и при этом позволять проводить одновременно несколько измерений температуры, что может быть обеспечено применением многоканальных систем передачи и приема СВЧ сигнала в системе «медицинский прибор — объект биологического исследования» [6—11].

Дальнейшее развитие метода радиометрии затрудняется наличием ряда научно-технологических ограничений, которые необходимо преодолеть. Объединение в одном радиометрическом комплексе принципов многоканальности, многочастотности и микроминиатюрности приведет к существенному уменьшению размеров радиометрического приемника и к необходимости разработки принципиально новых конструктивных и технологических решений, а именно выполнение его в виде одного модуля,

что подразумевает использование монолитного интегрального исполнения. Результаты работ в данном направлении отображены в работах [12—14].

Таким образом, современная СВЧ аппаратура требует технических решений, обеспечивающих компактность разрабатываемых приборов и высокое быстродействие. Применение элементной базы, выполненной в виде монолитных интегральных схем, позволит увеличить вариативность схемотехнических решений при разработке современных микроволновых радиометров и, тем самым, обеспечить их оптимальные характеристики и расширения функциональных возможностей приборов. В работах [15—16] рассмотрены возможности использования интегральных микросхем в медицинских микроволновых радиотермометрах с целью улучшения характеристик и функциональных возможностей приборов.

2. Основная часть

Микроволновые радиотермометры могут быть созданы на основе различных принципов. Два наиболее распространенных варианта: радиотермометр полной мощности и радиотермометр, построенный на основе схемы *R. H. Dicke*. Большинство радиотермометров, представленных в публикациях, построено на базе данных схем или их модификациях [17—21]. На сегодняшний день медицинские радиометры работают в диапазоне частот 1—3 ГГц с глубиной проникновения в мягкие ткани 16—30 мм [16, 22]. В данном диапазоне частот реализовано большое количество различной полупроводниковой компонентной базы на основе таких материалов, как арсенид галлия, нитрид галлия и кремний — германий. Номенклатура такой компонентной базы достаточно большая — СВЧ диоды, дискретные транзисторы различного назначения и монолитные интегральные схемы на их основе [23—25]. На рис. 1 представлено схемотехническое решение приемника медицинского радиотермометра.

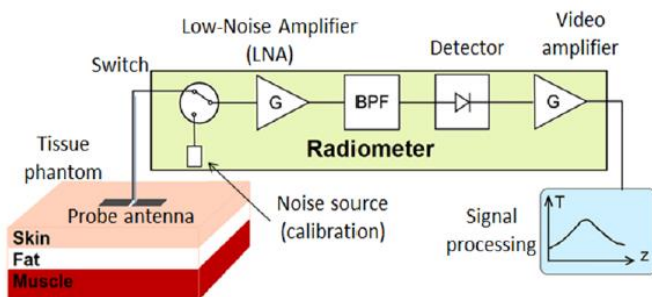


Рис. 1. Схемотехническое решение медицинского радиотермометра.

Fig. 1. Circuit design of a medical radiothermometer

Как видно из представленной схемы, основными элементами конструкции приемника радиотермометра, обеспечивающими технические и функциональные характеристики устройства, являются переключатель и малошумящий усилитель. Рассмотрим каждый из них с точки зрения возможности применения их в радиотермометре в монолитном интегральном исполнении.

На входе приемника располагается переключатель сигналов, который обеспечивает прием сигнала и калибровку по «горячей» и «холодной» нагрузке температуры. Реализация приема сигнала без калибровки и с калибровкой по температуре возможно с применением СВЧ полупроводниковых переключателей двух типов — *SPST* (однопозиционный переключатель) в конструкционном исполнении без калибровки по температуре и переключатели *SPDT* (двухпозиционный переключатель), изготовленных на эпитаксиальных гетероструктурах арсенида галлия в монолитном интегральном исполнении. В качестве активных элементов переключателя могут выступать СВЧ диоды или транзисторы, изготовленные по групповой технологии в едином технологическом цикле, обеспечивающие работу в диапазоне частот 1—3 ГГц. В случае применения монолитных интегральных схем (МИС) переключателя на основе транзисторов, работающих в режиме ключа, применяются эпитаксиальные арсенид галлиевые *pHEMT* гетероструктуры, которые обеспечивают высокую скорость переключения транзисторов.

В последнее время наблюдается значительный интерес к реализации СВЧ полупроводниковой компонентной базы на основе широкозонных материалов группы A^3B^5 . Применение гетероструктур *HEMT AlGaIn/GaN* на подложках полуизолирующего *SiC* по сравнению с традиционными для СВЧ области гетероструктурами на основе *GaAs* позволяет обеспечить минимальные размеры кристалла, эффективный отвод тепла, работать с высокими значениями мощности входного сигнала. В связи с этим применение такой компонентной базы в составе различных СВЧ приборов является достаточно перспективным.

В рамках данной работы был разработан монолитный переключатель с применением гетероструктур *HEMT AlGaIn/GaN*. Конструкция монолитного переключателя определялась областью применения разрабатываемого радиометра. Основные требования, предъявляемые к переключателям, являются миниатюрность и обеспечение малых значений вносимых потерь и высоких значений развязки в широком диапазоне частот. Наиболее чувствительные к отклику СВЧ сигнала от биологического объекта исследований радиометры работают в области частот 0,5—3 ГГц [9]. Еще одним существенным требованием к разрабатываемой элементной базе

является обеспечение в составе радиометра возможности приема сигнала и калибровки по «горячей» и «холодной» нагрузке температуры. На основании указанных требований была выбрана конструкция транзисторного переключателя тип *SPDT* (один вход — два выхода СВЧ сигнала) с минимальным топологическим размером 0,4 мкм для обеспечения надежной работы в указанном диапазоне частот.

Для разработки технологии изготовления транзисторного переключателя применялась отечественная эпитаксиальная *HEMT*-структура, которая была выращена методом газофазной эпитаксии на полуизолирующей подложке карбида кремния диаметром 76,2 мм производства АО «Светлана-Электронприбор».

В рамках настоящей работы проводилось численное моделирование и экспериментальная оптимизация конструкции гетероструктур полевых СВЧ-транзисторов (*HEMT*) на основе систем материалов *AlGaIn/GaN*. Разработанные гетероструктуры *HEMT* транзисторов (рис. 2) состояли из зародышевого слоя *AlGaIn* для подложек *SiC*, изолирующего буферного слоя *GaN* толщиной 2 мкм, слоя *AlN* толщиной 1 нм и нелегированного барьерного слоя *AlGaIn*. Толщина и состав слоя *AlGaIn* варьировались в различных вариантах расчета в диапазоне 15—35 нм и 20—35%, соответственно.

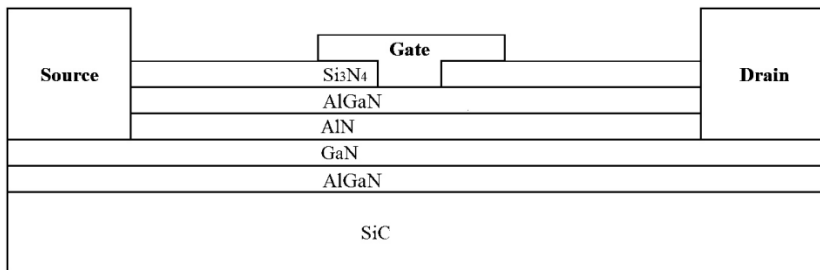


Рис. 2. Схематическое изображение разработанной гетероструктуры *HEMT* транзистора для использования в составе переключателя.

Fig. 2. Schematic representation of the developed HEMT transistor heterostructure for use as part of a switch

В результате проведенной численной оптимизации *HEMT* структура обеспечивала следующие характеристики: концентрация двумерного электронного газа в канале $9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и подвижность $1750 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{сек}$. Формирование металлизации омических контактов и разводки проводили с применением метода «взрывной» фотолитографии. В качестве металлизации омических контактов использовалась система *Ti/Al/Ni/Au* с последующим быстрым термическим отжигом при температуре $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ в среде азота. Межприборная изоляция осуществлялась методом ионной имплантации.

Формирование Ni/Au затворной металлизации (длина затвора $L_g = 0.4$ мкм и ширина $W_g = 2$ мкм) проводилось с помощью электронной литографии. Для исключения статического пробоя и повышения надежности в конструкции переключателя был предусмотрен тройной затвор. Диэлектрическая защита обеспечивалась нанесением слоя нитрида кремния. Сквозные заземляющие отверстия формировались плазмохимическим травлением подложки карбида кремния с последующей процессом магнетронного напыления металлизации Ti/Au . На рис. 3 представлен кристалл $HEMT AlGaN/GaN SPDT$ переключателя на пластине.

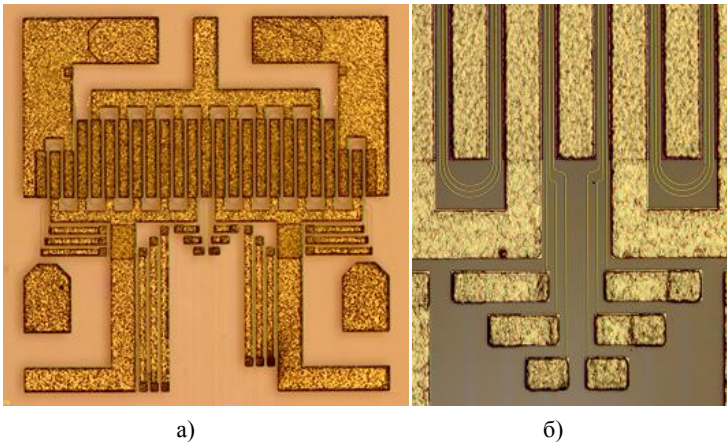


Рис. 3. Фрагмент кристаллов $HEMT AlGaN/GaN SPDT$ переключателя на пластине (а) и его затворная часть (б).

Fig. 3. Fragment of $HEMT AlGaN/GaN SPDT$ switch crystals on the plate (a) and its gate part (b).

Контроль ВАХ переключателя проводился с помощью зондовой станции *Cascade MicroTech PA-200*. На рис. 4 представлена типичная ВАХ кристалла $HEMT AlGaN/GaN SPDT$ переключателя.

Измерение СВЧ характеристик были проведены с помощью контрольно-измерительного стенда в составе зондовой станции *Cascade PM5* и векторного анализатора *Rohde&Schwarz ZVB-20* непосредственно на кристалле без использования СВЧ тестовой платы. На рис. 5 приведены ключевые характеристики разработанного переключателя — потери на проход и изоляция закрытого канала.

Как видно из представленных данных, разработанный переключатель обеспечивает потери в одном канале на проход СВЧ сигнала 0,66—1,27 дБ и изоляцию не хуже 25—11,5 дБ в диапазоне частот 0,5—3 ГГц. При согласовании разработанного переключателя на тестовой плате (рис. 6) наблюдается улучшение ключевого параметра — потери СВЧ сигнала на

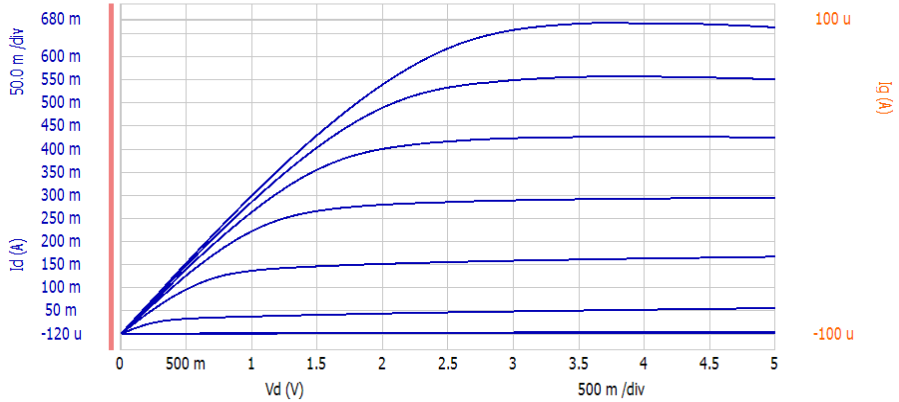


Рис. 4. ВАХ кристалла *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* переключателя.

Fig. 4. CVC of the HEMT AlGaIn/GaN SPDT switch crystal

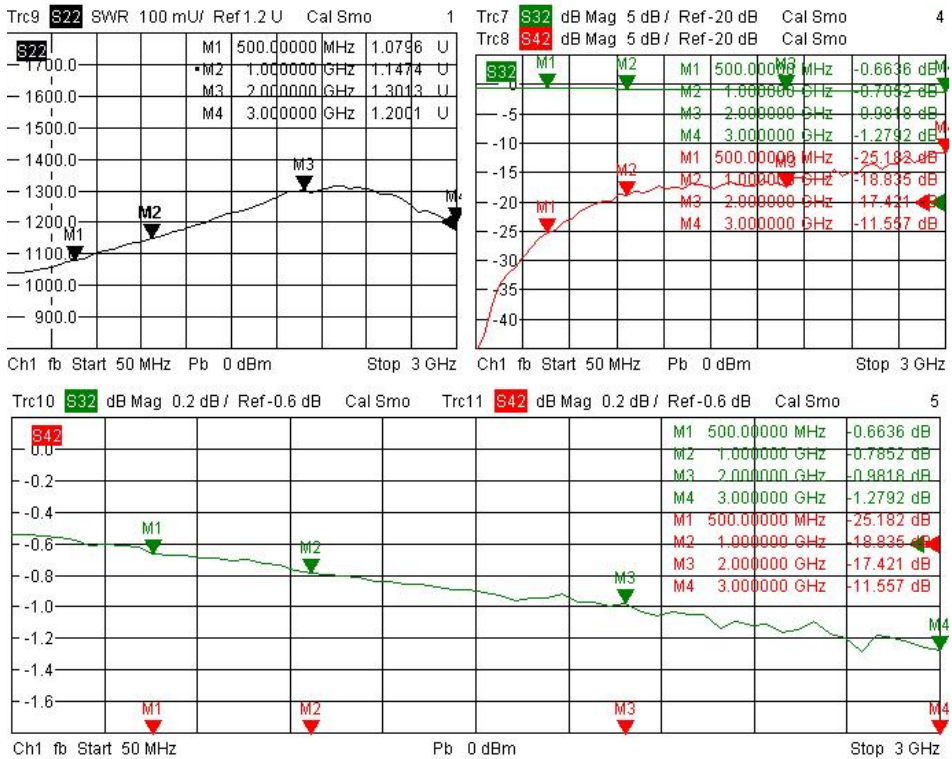


Рис. 5. Малосигнальные СВЧ характеристики *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* переключателя.

Fig. 5. Small-signal microwave characteristics of HEMT AlGaIn/GaN SPDT switch

проход 0,39—0,9 дБ, значение КСВН не превышает 1,33 дБ, а изоляция изменяется в указанном диапазоне частот от 26 дБ на частоте 0,5 ГГц до 14 дБ при частоте 3 ГГц (рис. 7), что необходимо учитывать при согласовании кристалла переключателя при монтаже в корпус микроволнового радиометра.

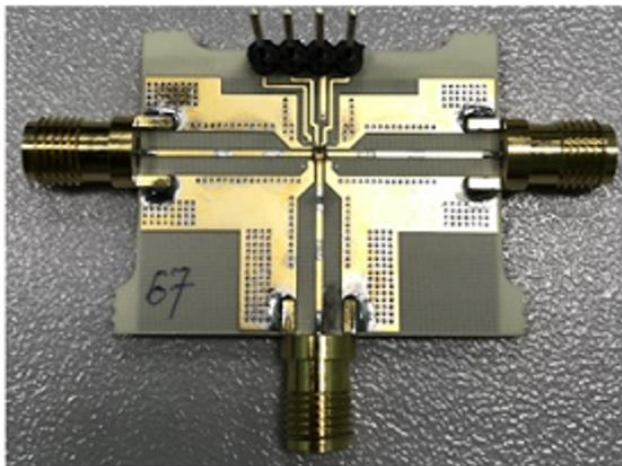


Рис. 6. HEMT AlGaIn/GaN SPDT переключатель на тестовой плате.

Fig. 6. HEMT AlGaIn/GaN SPDT switch on test board

Таким образом, в работе представлена разработанная конструкция HEMT AlGaIn/GaN SPDT переключателя на отечественной гетероструктуре на подложке полуизолирующего карбида кремния. Проведенные измерения СВЧ параметров разработанного переключателя, показывают возможность применения данной элементной компонентной базы в составе микроволновых радиометров, что позволит объединить в одном радиометрическом комплексе принципы многоканальности, многочастотности и миниатюризации и приведет к расширению его функциональных возможностей и существенному уменьшению размеров.

Еще одним из основных элементов конструкции приемника медицинских радиотермометра, обеспечивающих качественный прием СВЧ сигнала, является малошумящий усилитель. Основным критерием выбора разработчиком медицинского радиотермометра из достаточно большой номенклатуры изделий МИС малошумящего усилителя (МШУ) является согласование с МИС переключателя и обеспечение высокого коэффициента усиления и малых значений уровня шума [26].

Поскольку элементная компонентная база, реализованная на *pHEMT* гетероструктурах AlGaAs/GaAs, обладает наименьшими коэффициентами шума, именно такие гетероструктуры используются при изготовлении ги-

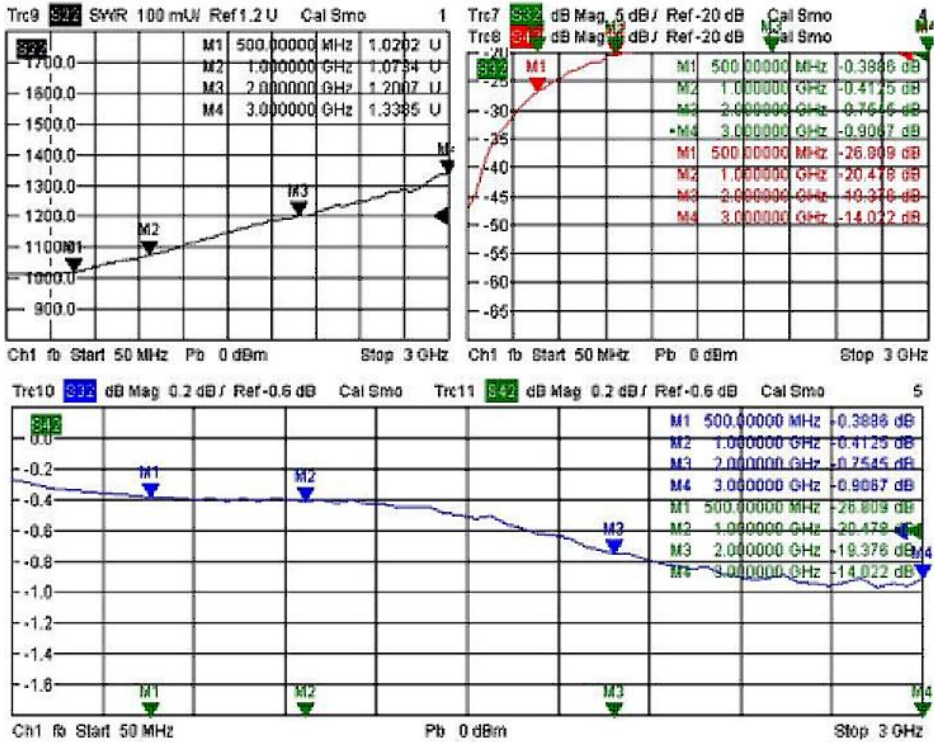


Рис. 7. Малосигнальные СВЧ характеристики *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* переключателя на тестовой плате после согласования.

Fig. 7. Small-signal microwave characteristics of *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* switch on the test board after matching

бридных и монокристаллических МШУ. Для снижения коэффициента шума требуется небольшая длина затвора и низкое паразитное сопротивление между затвором и истоком. Типичными значениями длины затвора являются 0,25—0,5 мкм. Для снижения коэффициента шума системы в целом важно снизить потери в цепях, особенно перед первым каскадом МШУ. Это включает линию передачи от антенны к устройству. Кроме снижения потерь в цепях, шум может быть уменьшен при работе усилителя на низких температурах, токах и напряжениях. Наконец, коэффициент шума МШУ зависит от степени согласования цепей, которые проектируются с учетом минимизации коэффициента шума и максимизации усиления. Оптимальным с этой точки зрения является *HEMT* [27—29].

На сегодняшний день в РФ опытом изготовления МИС МШУ в частотном диапазоне 1—3 ГГц на основе арсенида галлия обладает АО

«Светлана-Электронприбор». В качестве материала, который применялся для создания кристаллов усилителя, применялись эпитаксиальные гетероструктуры на основе арсенида галлия. Гетероструктуры изготавливались на полупроводящих подложках арсенида галлия, эпитаксиальные слои выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Кристаллы МШУ были изготовлены на двух типах транзисторных гетероструктур — *MESFET* и *pHEMT*. Изготовление кристаллов МШУ на обоих типах гетероструктур проводилось по стандартной технологии для материалов A^3B^5 — технологии «взрывной» литографии. Для обеспечения оптимальных характеристик в диапазоне частот 1—3 ГГц транзисторы в кристаллы МШУ изготавливались по технологии с проектной нормой по длине затвора 0.5 мкм. Такие топологические размеры обеспечивались применением в технологическом процессе изготовления установки электронной литографии. Омические контакты формировались с применением металлизации *AuGe-Ni-Au*, межэлементная изоляция осуществлялась методом ионной имплантации. В качестве барьера Шоттки применялась металлизация *Ti/Au*. Защита активных (транзисторы) и пассивных (емкости, сопротивления, индуктивности) элементов топологии кристаллов МШУ проводилась с помощью процессов плазмохимического осаждения диэлектрических пленок на основе нитрида кремния. С точки зрения усиления сигнала более предпочтительным для создания МШУ является применение *pHEMT* гетероструктур — высокие значения концентрации основных носителей заряда в канале и подвижности позволяют существенно увеличить коэффициент усиления, что является важным условием при приеме слабых сигналов. Однако при общих подходах в технологии изготовления транзисторов в составе МШУ (*MESFET* и *pHEMT* гетероструктуры) критически важной операцией для транзисторов на основе *pHEMT* гетероструктур является жидкостное селективное травление. На сегодняшний день в АО «Светлана-Электронприбор» проведен ряд работ, результатом которых является разработанная технология жидкостного травления эпитаксиальных гетероструктур с применением различных селективных травителей на основе перекиси водорода, водного раствора аммиака, серной кислоты и различных соединений цитратов. Разработанная технология позволяет обеспечить высокий процент выхода годных по токам насыщения. Опытные образцы кристаллов МИС МШУ имели значения коэффициента усиления в диапазоне 18—20 дБ коэффициент шума меньше 2,2 дБ, что является достаточно хорошим результатом для усиления слабых сигналов. На рис. 8 представлен фрагмент кристалла МИС МШУ, выполненного на арсенидгаллиевой *pHEMT*.

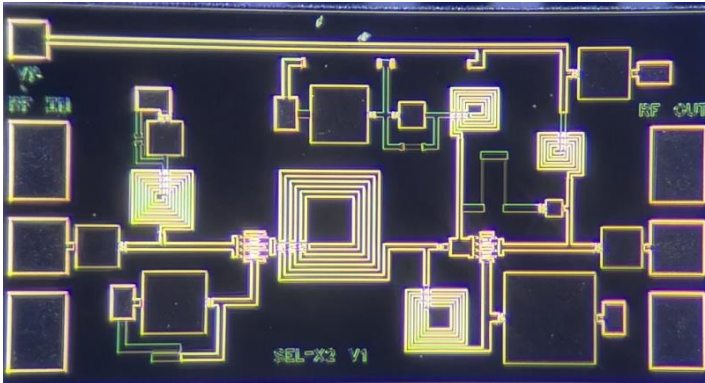


Рис. 8. Фрагмент топологии кристалла МИС МШУ разработанного на основе *pHEMT* гетероструктуры арсенида галлия для работы в диапазоне частот 1—3 ГГц.

Fig. 8. A fragment of the topology of the MIS LNA crystal developed on the basis of the *pHEMT* gallium arsenide heterostructure for operation in the frequency range of 1–3 GHz

3. Заключение

Таким образом, сделан обзор элементной базы МИС СВЧ для применения в медицинских радиотермометрах с целью улучшения технической характеристик и расширения функциональных возможностей устройств.

Проведенный аналитический обзор элементной базы МИС СВЧ для применения в медицинских радиотермометрах показал широкие возможности в области схемотехнических решений на основе отечественной элементной компонентной базы. Применение монолитных интегральных схем различного назначения на основе полупроводниковых гетероструктур материалов группы A^3B^5 позволяет обеспечить требуемые характеристики работы радиотермометра в части приема, усиления и обработки СВЧ сигнала, существенно повысить функциональные возможности и реализовать конструкционное исполнение с значительным снижением массогабаритных характеристик разрабатываемого медицинского прибора.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения соглашения № 19-19-00349-П.

Список литературы

1. Приборы для диагностики патологических изменений в организме человека методами микроволновой радиометрии / Ю. В. Гуляев и др. // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век. 2017. Т. 9, № 2. С. 27—45.

2. The specific of 3D passive radars sensing alive and non-alive objects / I. Sidorov et al. // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). Dolgoprudny, Russia, 2019. P. 1—4.
3. Моделирование собственного теплового излучения почки в микроволновом диапазоне / М. К. Седанкин и др. // Медицинская техника. 2019. № 1. С. 44—47.
4. Исследование возможностей радиочастотной идентификации с пассивными метками в инвазивной биосенсорике / А. Г. Гудков и др. // Медицинская техника. 2015. № 2. С. 26—29.
5. On the Possibility of Detecting Oil Films on a Water Surface by Methods of Microwave Radiometry / A. G. Gudkov et al. // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 55. P. 57—62.
6. Research of a microwave radiometer for monitoring of internal temperature of biological tissues / S. Vesnin et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 4, no. 5 (100). P. 6—15.
7. Антенны-апликаторы для медицинских микроволновых радиотермографов / М. К. Седанкин и др. // Медицинская техника. 2018. №4. С. 13—15.
8. Моделирование антенн-апликаторов унифицированных антенных решеток модульного типа для многоканальных систем радиотермокартирования / А. Ф. Бобрихин и др. // Антенны. 2014. № 2. С. 17—26.
9. Приборы для диагностики патологических изменений в организме человека методами микроволновой радиометрии / Ю. В. Гуляев и др. // Нанотехнологии : разработка, применение. 2017. Т. 9, № 2. С. 27—45.
10. Стаценко Л. Г., Пуговкина О. А. Проектирование СВЧ-устройств для микроволновой радиотермометрии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №10. С. 127—135.
11. Устройства СВЧ и антенные системы. Кн. 2. Моделирование, проектирование и технологии СВЧ-устройств и ФАР / Под. ред. А. Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2014. 198 с.
12. Prospects for application of radio-frequency identification technology with passive tags in invasive biosensor systems / A. Gudkov et al. // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49, no. 2. P. 98—101.
13. Обнаружение локального источника тепла в глубине тела человека методом объемной радиотермографии / Е. П. Новичихин и др. // Медицинская физика. 2020. Т. 12, № 2. С. 305—312.
14. The relationship between the reliability of transistors with 2D AlGaIn/GaN channel and organization type of nanomaterial / V. V. Emtsev et al. // Technical Physics Letters. 2016. Vol. 42, no. 7. P. 701—703.
15. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain / A. G. Gudkov et al. // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53, no. 2. P. 108—111.
16. Studies of a Microwave Radiometer Based on Integrated Circuits / A. G. Gudkov et al. // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 53. P. 413—416.
17. Многоканальный микроволновый радиотермометр / М. К. Седанкин и др. // Междунар. науч.-тех. конф. «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». 2017. С. 348—350.
18. Электронный модуль многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования / В. Н. Вьюгинов и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 1. С. 27—34.
19. Результаты разработки унифицированного приемного модуля для многоканальных медицинских радиотермографов / С. В. Агасиева и др. // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМи-Ко'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014 г. Севастополь: Вебер, 2014. Том 2. С. 1045—1046.

20. Результаты разработки экспериментального образца прибора для неинвазивной диагностики состояния головного мозга с использованием метода многоканальной микроволновой радиометрии / В. Ю. Леушин и др. // Нанотехнологии : разработка, применение — XXI век. 2019. Т. 11. № 1. С. 44—50.
21. Электронный модуль многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования / В. Н. Вьюгинов и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 1. С. 27—34.
22. Гудков А. Г. Электронные устройства СВЧ. Кн. 2 / Под ред. И. В. Лебедева. М. : Радиотехника, 2008. 400 с.
23. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 1 / Под ред. А. Г. Гудкова и В. В. Попова. М. : ООО «Автотест», 2012. 212 с.
24. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 2 / Под ред. А. Г. Гудкова и В. В. Попова. М. : ООО «Автотест», 2013. 214 с.
25. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 3 / Под ред. В. Н. Вьюгинова, А. Г. Гудкова и В. В. Попова. М. : ООО НТП «Вираз-Центр», 2016. 252 с.
26. Патент на изобретение № 2646536 (РФ). Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной температурной стабильностью вольт-амперной характеристики / А. Г. Гудков и др. Оpubл. в Б. И. 2018. № 7.
27. Simulation of electric field distribution in GaN HEMTs for the onset of structure degradation / A. Gudkov et al. // Proceedings of the 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, EMCCompo. 2017. P. 115—118.
28. Evaluation of the influence mode on the CVC GaN HEMT using numerical modeling / A. G. Gudkov et al. // Journal of Physics : Conference Series. 2016. Vol. 741, iss. 1. Art. no. 012024.
29. Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation / A. G. Gudkov et al. // Journal of Physics : Conference Series. 2019. Vol. 1410. no. 012191.

Информация об авторах

Чижиков Сергей Владимирович, младший научный сотрудник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

Попов Владимир Васильевич, президент ПАО «Светлана», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Тихомиров Владимир Геннадьевич, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Соловьев Юрий Владимирович, заместитель директора по науке АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Агандеев Роман Вячеславович, студент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

The Element Base of the MIC Microwave for a Multichannel Multi-Frequency Radiothermometer

S. V. Chizhikov¹, V. V. Popov², V. G. Tikhomirov³,
Yu. V. Solov'ev², and R. V. Agandeev¹

¹ Bauman Moscow State Technical University
5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation
chigikov95@mail.ru

² JSC "Svetlana-Electronpribor"
5, Prof. Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation

³ St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
27, Engels ave., St. Petersburg, 194156, Russian Federation

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Modern medical microwave diagnostic equipment requires the use of solutions related to the compactness of the developed devices and high performance. It is possible to achieve the set conditions with the use of a modern semiconductor component base based on A^3B^5 compounds. The paper presents the designs of the main control elements of the microwave signal as part of the microwave radiothermometer monolithic AlGaIn/GaN/SiC HEMT SPDT transistor switch and MIC LNA developed on the basis of the pHEMT heterostructure of gallium arsenide.

Keywords: radiothermometry, monolithic integrated circuits, heterostructures.

For citation (IEEE): S. V. Chizhikov, V. V. Popov, V. G. Tikhomirov, Yu. V. Solov'ev, and R. V. Agandeev, "The Element Base of the MIC Microwave for a Multichannel Multi-Frequency Radiothermometer," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 515–530, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.37. (In Russ.).

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation under agreement No. 19-19-00349-II.

References

- [1] Yu.V. Gulyaev, V. Yu. Leushin, A. G. Gudkov, S. G. Vesnin et al., "Devices for diagnosing pathological changes in the human body using microwave radiometry," // *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye – XXI vek*, vol. 9, no. 2, pp. 27–45. 2017. (In Russ.).
- [2] I. Sidorov, A. Gudkov, E. Novichikhin, A. Taradin, R. Haarbrink, and S. Chizhikov, "The specific of 3D passive radars sensing alive and non-alive objects," *2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. Dolgoprudny, Russia, pp. 1–4, 2019.

- [3] M. K. Sedankin et al., “Modeling of the own thermal radiation of the kidney in the microwave range,” *Meditsinskaya tekhnika*, no. 1, pp. 44–47, 2019. (In Russ.).
- [4] A. G. Gudkov, S. V. Agasieva et al., “Investigation of the possibilities of radio frequency identification with passive tags in invasive biosensors,” *Meditsinskaya tekhnika*, no. 2, pp. 26–29, 2015. (In Russ.).
- [5] A. G. Gudkov et al., “On the Possibility of Detecting Oil Films on a Water Surface by Methods of Microwave Radiometry,” *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 55, no. 1–2, pp. 57–62, May 2019, doi: 10.1007/s10556-019-00580-2.
- [6] S. G. Vesnin, M. Sedankin, V. Leushin, V. Skuratov, I. Nelin, and A. Konovalova, “Research of a microwave radiometer for monitoring of internal temperature of biological tissues,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 5 (100), pp. 6–15, Aug. 2019, doi: 10.15587/1729-4061.2019.176357.
- [7] M. K. Sedankin et al. “Antenna-applicators for medical microwave radio thermographs,” *Meditsinskaya tekhnika*, no. 4, pp.13–15, 2018. (In Russ.).
- [8] A. F. Bobrikhin et al., “Modeling antenna-applicators of unified antenna arrays of modular type for multichannel radiothermal mapping systems,” *Antenny*, no. 2, pp.17–26, 2014. (In Russ.).
- [9] Yu. V. Gulyaev et al., “Instruments for diagnosing pathological changes in the human body by microwave radiometry,” *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye*, vol. 9, no. 2, pp. 27–45, 2017. (In Russ.).
- [10] L. G. Statsenko and O. A. Pugovkina, “Designing microwave devices for microwave radio-thermometry,” // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki*, no. 10, pp. 127–135, 2014. (In Russ.).
- [11] A. G. Gudkov, V. V. Popov, A. E. Chalykh et al. *Microwave devices and antenna systems. Book. 2. Modeling, design and technology of microwave devices and phased array*, ed. A. Yu. Grinev, Moscow: Radiotekhnika, 2014. (In Russ.).
- [12] A. G. Gudkov et al., “Prospects for Application of Radio-Frequency Identification Technology with Passive Tags in Invasive Biosensor Systems,” *Biomedical Engineering*, vol. 49, no. 2, pp. 98–101, Jul. 2015, doi: 10.1007/s10527-015-9506-x.
- [13] E. P. Novichikhin, I. A. Sidorov, V. Yu. Leushin, S. V. Agasieva, and S. V. Chizhikov, “The local heat source detection inside of the human body by means of microwave radiothermography,” *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, vol. 12, no. 2, pp. 305–312, Aug. 2020, doi: 10.17725/rensit.2020.12.305. (In Russ.).
- [14] V. V. Emtsev et al., “The relationship between the reliability of transistors with 2D AlGaIn/GaN channel and organization type of nanomaterial,” *Technical Physics Letters*, vol. 42, no. 7, pp. 701–703, Jul. 2016, doi: 10.1134/s1063785016070075.
- [15] A. G. Gudkov et al., “Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain,” *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 108–111, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09887-z.
- [16] A. G. Gudkov et al., “Studies of a Microwave Radiometer Based on Integrated Circuits,” *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 6, pp. 413–416, Mar. 2020, doi: 10.1007/s10527-020-09954-w.
- [17] M. K. Sedankin et al., “Multichannel microwave radiothermometer,” *Mezhdunar. Nauch.-Tekh. Konf. «Informatika i tekhnologii. Innovatsionnyye tekhnologii v pro-myshlennosti i informatike*, pp. 348–350, 2017. (In Russ.).
- [18] V. N. Vyuginov et al., “Electronic module of a multichannel microwave path for radio thermal mapping systems,” *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy*, no. 1, pp. 27–34, 2014. (In Russ.).

- [19] S. V. Agasieva, A. G. Gudkov, A. V. Korolev, V. Yu. Leushin, V. A. Plushev, I. A. Sidorov, “Results of the development of a unified receiving module for multichannel medical radio-thermographs,” 24th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014). Sevastopol, September 7–13, 2014. Sevastopol: Weber, vol. 2, pp. 1045–1046, 2014. (In Russ.).
- [20] V. Yu. Leushin, V. D. Shashurin, S. V. Chizhikov et al., “Results of the development of an experimental sample of a device for non-invasive diagnostics of the state of the brain using the method of multichannel microwave radiometry,” *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye – XXI vek*, vol. 11, no. 1, pp. 44–50, 2019. (In Russ.).
- [21] V. N. Vyuginov et al., “Electronic module of multichannel microwave path for radio thermal mapping systems,” *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy*, vol. 19, no. 1, pp. 27–34, 2014. (In Russ.).
- [22] A. G. Gudkov, *Microwave electronic devices*, book 2, ed. I. V. Lebedev, Moscow: Radio-tekhnik, 2008. (In Russ.).
- [23] Improving the reliability and quality of microwave GIS and MIS, book 1, ed. A. G. Gudkov and V. V. Popov, Moscow: Autotest LLC, 2012. (In Russ.).
- [24] Improving the reliability and quality of microwave GIS and MIS, book 2, ed. A. G. Gudkov and V. V. Popov, Moscow: Avtotest LLC, 2013. (In Russ.).
- [25] Improving the reliability and quality of microwave GIS and MIS, book 3, ed. V. N. Vyuginov, A. G. Gudkov and V. V. Popov, Moscow: Virazh-Center LLC, 2016. (In Russ.).
- [26] A. G. Gudkov, S. V. Chizhikov et al., patent No. 2646536 (RF). Heterostructural field-effect transistor based on gallium nitride with improved temperature stability of the current-voltage characteristic. Published in Bulletin of Inventions, no. 7, 2018. (In Russ.).
- [27] V. G. Tikhomirov et al., “Simulation of electric field distribution in GaN HEMTs for the onset of structure degradation,” 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo), Jul. 2017, doi: 10.1109/emccompo.2017.7998094.
- [28] Y. M. Parnes et al., “Evaluation of the influence mode on the CVC GaN HEMT using numerical modeling,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 741, p. 012024, Aug. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/741/1/012024.
- [29] V. G. Tikhomirov, A. G. Gudkov, S. V. Agasieva, D. D. Dynaiev, M. K. Popov, and S. V. Chizhikov, “Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1410, no. 1, p. 012191, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012191.

Information about the authors

Sergey V. Chizhikov, junior research assistant at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Vladimir V. Popov, the president at PJSC “Svetlana”, Saint Petersburg, Russian Federation.

Vladimir G. Tikhomirov, associate Professor at Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russian Federation.

Yuriy V. Solov’ev, Deputy Director for Science at JSC “Svetlana-Electronpribor”, Saint Petersburg, Russian Federation.

Roman V. Agandeev, student at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.