

Салих Аятулла, магистрант

*Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники*

Мосейчук Виталий Алексеевич, магистрант

*Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники*

Сиренко Павел Станиславович, магистрант

Томский политехнический университет (ТПУ)

Кудабай Ержан, магистрант

*Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники*

АНАЛИЗ РАЗРАБОТОК И ПРИМЕНЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ С-ДИАПАЗОНА

Аннотация: Целью данной статьи является обзор и анализ монолитных интегральных схем (МИС) малошумящих усилителей (МШУ) С-диапазона (4-8 ГГц) и обзор области применения МИС МШУ. Также были описаны полупроводниковые материалы, то есть технологии полупроводниковых приборов, которые используются в проектировании МИС МШУ, аттенуаторов, фазовращателей, усилителей мощности и автогенераторов и т.д., а именно кремний (Si), карбид кремния (SiC), арсенид галлия (GaAs) и нитрид галлия (GaN). Также было описано обобщенное состояние производства полупроводниковых материалов, их плюсы и минусы как в массовом, так и единичном использовании. Рассмотрены области применения С-диапазона, а также описана история его развития, области и условия его эксплуатации. Представлена оценка современных разработок зарубежных МИС МШУ

серийного производства С-диапазона. Также были рассмотрены достигнутые в разработках параметры и области применения разработанных устройств.

Ключевые слова: Малошумящий усилитель, монолитная интегральная схема, С-диапазон, GaN, GaAs, SiC, Si, коэффициент шума.

Abstract: The purpose of this paper is to review and analyze low noise amplifiers (LNAs) of microwave monolithic integrated circuits (MMICs) in the C-band (4-8 GHz). Additionally, semiconductor materials from MMIC device technologies were considered, which are used in the design of MMIC LNAs, attenuators, phase shifters, power amplifiers and oscillators: silicon (Si), silicon carbide (SiC), gallium arsenide (GaAs), and gallium nitride (GaN). It also describes the general state of semiconductor materials production, their advantages and disadvantages, both in mass and in single use. It is considered application areas, history of development operation conditions of the C-band, the state, production, the achieved parameters and the areas of application of the C-band MMIC LNAs.

Keywords: LNA, MMIC, C-band, GaN, GaAs, SiC, Si, Noise Figure

1. Введение

За последние годы изготовлению (МИС) предъявляются высокие требования по снижению стоимости, повышению надежности, уменьшению габаритов и общей массы. Системный расчет приемно-передающих устройств (в первую очередь) подразумевает проектирование входных каскадов устройства и определение ключевых параметров, таких как: коэффициента усиления и коэффициент шума. Типовым решением в общей структуре приемного устройства в качестве входных каскадов используются малошумящие усилители (МШУ) [1]. С МШУ ситуация в приемнике выглядит следующим образом. МШУ должен иметь максимально низкий уровень коэффициента шума при достаточно большом коэффициенте усиления и динамическом диапазоне по входу.

2. Технология полупроводниковых приборов, применяемых в разработках МИС МШУ

Свойства полупроводникового материала определяется наличием примесей и внешних влияющих факторов (излучения, давление, температура и т.д.). Полупроводники различают на чистые и примесные это разделение обуславливают химическим составом. Доминирующими материалами в производстве полупроводниковых приборов являются кремний, карбид кремния, соединения галлия и индия. Для твердотельных узлов, наряду с кремниевыми транзисторами, активно развиваются транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), а также их псевдоморфные (pHEMT) и метаморфные (mHEMT) модификации, выполненные на таких полупроводниковых материалах, таких как: кремний германий (SiGe), арсенид галлия (GaAs), индийфосфат (InP) и нитрид-галлия (GaN). [2].

По динамическим характеристикам кремний германиевая (SiGe) технология конкурирует с распространенным на сегодняшний день арсенидом галлия (GaAs), но все-таки уступает ему по максимальной величине напряжения (не более 1,8-5 В в зависимости от частоты для разных типов транзисторов на основе SiGe технологии). Возможность использования базиса БиКМОП (технология изготовления интегральных микросхем с использованием биполярных и КМОП транзисторов на одном кристалле) добавляет SiGe небольшое преимущество перед GaAs-технологией. Транзисторы на технологии БиКМОП с кремний германиевой (SiGe) основой позволяют реализовать большое количество операционно-вычислительных функций на одном чипе для получения сложнофункциональных устройств. Новейшие технологии дают возможность изготавливать усилители и другие узлы тракта сверхминиатюрного размера, что в свою очередь позволяет добиться общей компактности устройств [3].

За рубежом еще с 2000 годов для определенного ряда техники как для гражданского, так и для специального назначения наблюдалась тенденция постепенной замены СВЧ МИС на основе арсенида галлия (GaAs) кремнийгерманиевыми в диапазоне частот до 70-100 ГГц. В США были приняты программы на период 2003-2014 по развитию SiGe гетероструктурных

биполярных транзисторов для аналого-цифровых кремний германиевых (SiGe) БиКМОП МИС с частотами 10 ГГц. Кремний германиевая (SiGe) технология имеет реальные перспективы применения в измерительных приборах сфокусированные на широкое коммерческое применение [4].

Арсенид галлия (GaAs) благодаря ряду присущих ему свойств, является одним из базовых и перспективных материалов микроэлектроники. Этот материал используется в качестве подложек при изготовлении МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) - транзисторов и интегральных схем. К числу важных свойств арсенида галлия (GaAs) наряду с большой шириной запрещенной зоны и высокой подвижностью носителей заряда относится широкий диапазон изменения параметров при легировании различными примесями. Легирующие добавки эффективно влияют на состояние собственных точечных дефектов в кристаллах, на особенности поведения в них дислокаций и фоновых примесей. В итоге приводит к существенному расширению возможностей полупроводникового материала и структур на его основе [5]. В Томском Сибирско-техническом институте, а затем и в НИИ полупроводниковых приборов долгий период времени в 50 лет коллектив сотрудников проводит начатые под руководством С.С. Хлудкова работы, связанные с исследованием закономерности легирования арсенида галлия (GaAs) примесями с глубокими энергетическими уровнями и созданием структур и приборов на его основе [6].

Полупроводниковые устройства на основе арсенида галлия (GaAs) были и остаются важнейшим рынком. Довольно долгое время арсенид галлия (GaAs) широко применялся в полупроводниковых устройствах. Например, это - малошумящие усилители, фазовращатели, усилители мощности, аттенюаторы, автогенераторы и т. д. Основным преимуществом арсенида галлия (GaAs) является высокая скорость носителей заряда. Как материал подложки он быстрее и эффективнее, чем кремний в интегральных схемах так, как электроны движутся почти в пять раз быстрее. Однако еще нельзя забывать, что арсенид галлия

(GaAs) способен работать в более широком диапазоне температур, чем кремний и имеет большую плотность излучения.

Полупроводниковые транзисторы на основе нитрида-галлия (GaN) в настоящее время стремятся занять лидирующие позиции в микроэлектронной промышленности, постепенно вытесняя с рынка арсенид галлия (GaAs). Связано это с рядом преимуществ нитрид-галлиевых (GaN) изделий - высокая удельная мощность на единицу длины затвора, широкий диапазон рабочих частот, высокие значения пробивных напряжений сток-исток, высокая подвижность электронов. В Российской Федерации разработки и исследования эпитаксиальных структур нитрида-галлия (GaN) и транзисторов на их основе проводятся рядом предприятий и научно-исследовательских институтов. Из них можно выделить: АО «Светлана-Рост», АО «Светлана-Электронприбор», АО «НИИЭТ», ИСВЧПЭ РАН, ЗАО «Элма-Малахит», ИФП РАН, АО НПФ «Микран» и АО НПП «Пульсар» [1].

Отличные характеристики нитрида галлия (GaN) (см. Табл. 1) зарекомендовал себя как уникальный материал, который способен справиться с энергетическими трудностями будущего. Приборы, основанные на нитриде-галлия (GaN) обладают хорошей энергетической эффективностью, высоким пробивным напряжением, высокой плотностью тока, что, в итоге, позволяет уменьшить потери мощности, улучшить работоспособность на более высоких частотах, а также значительно уменьшить габариты и массу приборов. Все вышеперечисленное дало возможность в полной мере применять его в разных областях полупроводниковой отрасли. Структуры, основанные на нитриде-галлия (GaN) очень перспективны для разработки приемо-передающей СВЧ-электроники. Главное преимущество нитрида-галлия (GaN) его высокая удельная мощность, которая позволяет значительно упростить топологию интегральных схем и улучшить массогабаритные параметры.

Сейчас компанией OMMIC решены основные технические производственные проблемы нитрида-галлия (GaN), не позволявшие выйти на коммерческий уровень. Технологиям на основе нитрида-галлия (GaN), и

арсенида галлия (GaAs) уже совсем скоро будет доступен диапазон частот до 160 ГГц. Но нельзя забывать, что производство приборов на основе нитрида-галлия (GaN) имеет существенные преимущества по параметрам и свойствам, тогда как GaAs дешевле по себестоимости и освоению в массовом производстве. Новая технология постоянно развивается и по уровню внедрения в эксплуатацию снизится и уровень себестоимости с учетом того, что основные преимущества будут сохранены [9] (см. Табл. 1).

Таблица 1. Сравнение свойств полупроводниковых материалов

| Характеристики материала, ед. изм. | Si | GaAs | SiC | GaN |
|---|------|------|-----|------|
| Ширина запрещенной зоны, эВ | 1.1 | 1.4 | 3.2 | 3.5 |
| Критическая напряженность эл. поля, МВ/см | 0.3 | 0.4 | 3 | 3.3 |
| Теплопроводность, Вт/м · К | 1.5 | 0.5 | 4.9 | >1.5 |
| Подвижность электронов, см ² /В · с | 1350 | 8500 | 700 | 2000 |
| Дрейфовая скорость насыщения электронов, ×10 ⁷ см/с | 1 | 2 | 2 | 2.7 |

АО «Российская электроника» начала стремительно развивать создание перспективных типов транзисторов, относящихся к самым передовым в мире. В частности, московский завод «Пульсар», входящий в холдинг уже приступил к проектированию транзистора на основе нитрида-галлия (GaN) - широкозонном полупроводнике. Такой транзистор сыграет значимую роль в развитии мобильной и космической связи [14].

Отечественными и зарубежными предприятиями производятся МИС в корпусном и бескорпусном исполнении различного типа, а также отличаются высокими эксплуатационными характеристиками. На сегодняшний день

массовое изготовление активных фазированных антенных решеток (АФАР) требует налаженного промышленного производства СВЧ монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) усилителей мощности, фазовращателей, аттенюаторов, генераторов, схем управления, а также малошумящих усилителей.

Малошумящие усилители (МШУ) используются для улучшения чувствительности приемных устройств по отношению к входящему сигналу. Малошумящие усилители активно используются в приемопередающих модулях (ППМ), которые в свою очередь применяются в АФАР. АФАР в нынешних системах радиолокации постоянно развивается. Ряд нескольких зарубежных производителей демонстрируют весь потенциал АФАР в бортовых системах вооружения самолетов. Подобные работы проводятся и отечественными производителями. Как упоминалось ранее, основными компонентами АФАР являются СВЧ ППМ на базе монолитных интегральных схем. Аналитические прогнозы рынка СВЧ модулей для космической и военной аппаратуры показывают, что ППМ в недалеком будущем могут стать одними из самых востребованных изделий СВЧ техники [8].

В структуру ППМ входят несколько МИС в том числе и малошумящие усилители, предварительные усилители, усилители мощности, переключатели и др. На ППМ и входящие в них МИС приходится около половины всей стоимости АФАР [11].

3 Разработки в С-диапазоне

С-диапазон - диапазон частот сантиметровых волн, используемых для наземной и спутниковой радиосвязи. Этот диапазон является основным для передачи спутникового телевидения, преимущественно в Северной и южной Америке (в Европе, Азии и Австралии более популярен Ku-диапазон (12-18 ГГц)). В России для этой задачи задействованы частоты от 3.5-4.2 ГГц на линии Спутник-Земля, и 5.975-6.475 ГГц на линии Земля-Спутник [15]. Поначалу спутниковые системы работали именно в С-диапазоне. В 80-х началось стремительное освоение Ku-диапазона, который изначально считался пригодным только для телевидения. С развитием наземного оборудования

многие сервисы, в том числе и распределительные сети, и магистральные каналы, запустили поэтапный переход на Ku-диапазон, но никто из спутниковых операторов и их пользователей не намерен отказываться от C-диапазона. Основной причиной является то, что этот диапазон, из всех представленных для коммерческого применения спутниковыми сервисами, наиболее устойчив к плохой погоде.

В C-диапазоне долгое время работали спутниковые операторы в Юго-Восточной Азии, так как сигнал меньше подвергался искажения из-за долгих тропических дождей. Значительным аспектом является то, что за последние несколько десятилетий под C-диапазон была создана серьезная и весьма дорогостоящая инфраструктура [5]. Тем не менее в C-диапазоне не формируется никаких новых сервисов. Наблюдая за этим создается мнение, что диапазон неоптимально эксплуатирован. Как говорилось ранее C-диапазон наиболее устойчив к воздействию погоды, и поэтому в нем работают службы предъявляющие высокие требования к надежности канала: магистральные каналы, государственные сети, телемедицина, управление воздушным трафиком и др. Сотовые операторы утверждают, что работа их сетей в C-диапазоне не будет создавать помех работе спутниковых служб [3].

Рассмотрим несколько разработок МИС от хорошо зарекомендовавших себя зарубежных фирм, которые на момент написания статьи массово производятся и имеются в продаже. Разработка CGY2120XUH/C1 компании ОММИС - это высокопроизводительная арсенид галлиевая (GaAs) однокаскадная МИС маломощного усилителя предназначенная работать в C-диапазоне. Микросхема имеет достаточно низкий уровень коэффициента шума 0.5 дБ при усилении 13 дБ. Предназначена она для применения в радарах, телекоммуникаций и измерительных приборах. МИС использует золотые контактные площадки, а также она полностью защищена нитридом кремния для достижения высочайшего уровня надежности [14] См. Таблица 2.

Разработка CGY2178UH/C1 - это МИС усилителя с высоким коэффициентом усиления и низким уровнем шума, который предназначен для

работы либо в микросборке вместе с микросхемами аттенюатора, фазовращателя или в качестве малошумящего усилителя общего назначения в С-диапазоне. Микросхема использует простую внешнюю согласующую цепь для обеспечения хорошего согласования входного сигнала и низкого коэффициента шума в диапазоне от 5 до 6 ГГц. Все схемы смещения, питания и выходного согласования находятся на кристалле. МИС изготавливается с использованием ведущей арсенид галлиевой (GaAs) технологии ОММИС 0,18 мкм рНЕМТ [15] См. Таблица 2.

Разработка CMD219 компании Custom MMIC - это широкополосная нитрид-галлиевая (GaN) МИС малошумящего усилителя, отлично подходящая для СВЧ радиоприемников С-диапазона, где требуются хорошие массогабаритные параметры, и достаточно высокая входная надежность с точки зрения входной мощности. Эта широкополосная МИС обеспечивает усиление более 23 дБ, выходную мощность 18 дБмВт с компрессией 1 дБ, и коэффициент шума 1 дБ. Микросхема CMD219 отличается хорошей устойчивостью к входной мощности более 5 Вт. [7] См. Таблица 2.

CMD219C4 - это широкополосная нитрид-галлиевая (GaN) МИС малошумящего усилителя выполненная в корпусе с планарными выводами. CMD219C4 отлично подходит для СВЧ радиоприемников С-диапазона, где требуются небольшие массогабаритные параметры и высокая входная надежность. Широкополосное устройство обеспечивает усиление более 22,5 дБ, 17 дБмВт мощности с компрессией 1 дБ и коэффициентом шума 1 дБ. CMD219C4 остается работоспособной при входной мощности более 5 Вт [17] См. Таблица 2.

Разработка HMC392A компании ANALOG DEVICES - это МИС малошумящего усилителя с низким уровнем шума на основе арсенида галлия (GaAs), которая работает в диапазоне от 3,5 до 7,0 ГГц. Усилитель обеспечивает усиление 17,2 дБ, коэффициент шума 1,7 дБ при напряжении питания +5 В. Микросхема имеет шесть возможных вариантов регулировки мощности, которые позволяют пользователю выбрать точку смещения и выходную мощность устройства (от +10 до +19,7 дБмВт). Усилитель может быть легко

интегрирован в многокристальные сборки ввиду его размеров в 1,3 мм² [18]. См. Таблица 2.

Разработка HMC392ALC4 компании ANALOG DEVICES - это МИС малошумящего усилителя на основе арсенид галлиевой (GaAs) технологии, работающая в диапазоне от 3,5 до 8,0 ГГц. Размещенная в корпусе, который имеет планарные выводы, для поверхностного монтажа 4x4 мм². Этот усилитель обеспечивает усиление 17 дБ, коэффициент шума 1,8 дБ и обладает точкой компрессии третьего порядка в 34,5 дБм при напряжении питания +5 В. Микросхема хорошо работает как входной каскад с низким уровнем шума. Микросхема позволяет использовать технологии поверхностного монтажа и подходит для применения в высоконадежных военных, промышленных и космических отраслях [19] См. Таблица 2.

Разработка HMC717ALP3E компании ANALOG DEVICES - это МИС малошумящего усилителя на основе арсенид галлиевой (GaAs) технологии, которая отлично подходит для беспроводных сетей, а именно для приемников базовых станций LTE/WiMAX/4G, работающих в диапазоне частот от 4,8 до 6,0 ГГц. Усилитель оптимизирован для обеспечения коэффициента шума 1,1 дБ, усиления 14,5 дБ и точкой компрессии третьего порядка в 29,5 дБм от одного источника +5В. Микросхема может иметь смещение от +3 В до +5 В и имеет регулируемое питание, которое позволяет разработчику настраивать характеристики линейности [20] См. Таблица 2.

Разработка QPL9098 компании Qorvo - это МИС высоколинейного блочного усилителя со сверхмалым коэффициентом шума и функцией полосового фильтра, интегрированного в продукт. На частоте 5,5 ГГц усилитель обеспечивает коэффициент усиления 19,6 дБ, +32 дБмВт OIP3 и коэффициент шума 1,3 дБ при потреблении тока 68 мА от источника питания +4,2 В. Микросхема согласована с использованием высокопроизводительного E-pHEMT транзистора. Требуется только четыре внешних компонента для работы от одного положительного источника питания: внешнего высокочастотного дросселя и блокирующих конденсаторов. Этот малошумящий усилитель содержит внутреннее активное смещение для поддержания высоких

характеристик при повышении температуры. Микросхема оптимизирована для диапазона частот 4,0–6,0 ГГц. [21] См. Таблица 2.

Разработка МААМ37000 компании МАСОМ - это МИС широкополосного маломощного усилителя. Она включает в себя два каскада и использует последовательную индуктивную обратную связь для обеспечения низкого коэффициента шума и хорошего входного и выходного согласования по всей полосе частот. Микросхема работает от одного источника питания +4 В. Хорошо работает в качестве маломощного усилителя в приемных применениях, а также в качестве предоконечного каскада усилителя мощности или буферного усилителя, где важны высокое усиление, хорошая линейность и низкое энергопотребление. Микросхема изготавливается с использованием арсенид галлиевого (GaAs) 500 нм процесса. Этот продукт протестирован на радиочастотные помехи, чтобы гарантировать соответствие техническим характеристикам [22] См. Таблица 2.

Таблица 2. - Серийные МИС МШУ С – диапазона

| Компания | Название | F_{min} , ГГц | F_{max} , ГГц | NF, дБ | Gain, дБ | S_{11} , дБ | S_{22} , дБ | $P_{вых}$, дБм | IP3, дБм |
|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|---------|-----------|---------------|---------------|-----------------|----------|
| OMMIC | CGY2120XUH | 5 | 7 | 0,5 | 13,2 | -6 | -10 | - | - |
| | CGY2178UH_DS_130910 | 5 | 6 | 1 | 30 | -15 | -15 | - | - |
| Custom MMIC | cmd219-0219 | 4 | 8 | 1 | 23 | -15 | -10 | 18 | - |
| | cmd219c4-0219-1 | 4 | 8 | 1 | 22,5 | -13 | -10 | 17 | - |
| ANALOG DEVICES | hmc392AC HIPS | 3,5 | 7 | 1,7-3,4 | 14,5-17,2 | -12 | -20 | 19,7 | |
| | hmc392Alc4 | 3,5 | 8 | 1,8-3 | 14,5-17 | -13 | -15 | - | 34.5 |
| | hmc717a | 4,8 | 6 | 1,3-1,8 | 11-14,5 | -8 | -13 | - | 29.5 |
| QORVO | QPL9098 | 4 | 6 | 1,3-1,8 | 17,5-22,5 | -11 | -12 | - | 32 |
| MACOM | XL1007-QT | 4 | 8 | 1,7-2,4 | 6,5-12 | -8 | -9 | - | - |

Описанные выше МШУ это хорошие примеры того, что в настоящее время применяется на рынке. Отечественные производители также имеют хорошие разработки, но они несколько отстают от зарубежных. В настоящее время в области создания электронных СВЧ компонентов имеется несколько целевых программ, направленных на создание перспективных СВЧ приборов и устройств для применения в радиоэлектронной аппаратуре различного функционального назначения. Как видно, в описанных разработках преобладает то, что разработки выполнены на основе арсенида галлия (GaAs). Однако, Нитрид-галлий (GaN) в будущем займет лидирующую позицию. Авторами данной статьи также разработаны несколько МИС на L, C, и X- диапазоны на основе нитрид-галлиевой (GaN) технологии французской компании OMMIC.

Заключение

Современные транзисторы на нитриде галлия однозначно расширили возможности мощных высокочастотных устройств. Достаточно высокая удельная мощность по сравнению с транзисторами на кремнии, карбиде кремния, арсениде галлия и других освоенных материалах. Малые габариты разрабатываемых устройств, надежность в условиях повышенных температур, высокий коэффициент усиления, все это доказывает высокую эффективность нитрид-галлиевой (GaN) технологии. МИС на основе нитрид-галлия позволяют создавать усилительные элементы с требуемыми параметрами для решения актуальных на сегодняшний день задач.

Малошумящий усилитель служит неотъемлемым функциональным узлом нынешних разработок приемо-передающих модулей АФАР и в большинстве случаев обуславливает качественные характеристики. МШУ С-диапазона являются востребованным на рынке устройством. Поэтому развитие разработок устройств для этого диапазона собственно, как для других, сегодня является актуальной задачей.

Библиографический список:

1. Марин В.П. «Применение монолитных интегральных схем в приемных устройствах РЛС».
2. Белов Л. «Твердотельные усилители малой и средней мощности» - Электроника: Наука, Технология, Бизнес 2006 г.
3. Шиганов А. «SiGe- технологии для высокоскоротных осциллографов» - Режим доступа http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2013/01/Vestnik_NSU_13T8V1_p125_p131.pdf.
4. В. Немудров «СВЧ кремний-германиевые монолитные интегральные схемы: преимущества и достижения» - Электроника 2015 г.
5. Толбанов О. П. «Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами» - 2016 г. издания.
6. Хлудков С.С. Арсенид галлиевые структуры с глубокими примесными центрами и приборы на их основе (история возникновения, становления и развития, основные результаты) // Сб. «40 лет НИИПП». Томск: Изд-во «Красное знамя», 2004.
7. Тарасов С.В. «Мощные GaN транзисторы S-, C-, X-диапазонов частот» - 2018 г.
8. «Гетероструктуры на основе нитрида галлия (GaN) и технологии компании OMMIC на их основе» - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://microwave-e.ru/materials/geterostruktury-na-osnove-gan/> (дата обращения 09.01.2021).
9. Транзисторы на основе GaN - [Электронный ресурс] - 2016 г. сайт\ <https://eloborud.ru/news/transistors-based-on-gan/> (дата обращения 05.01.2021).
10. Викулов И. «GaN-микросхемы приемопередающих модулей АФАР» - Электроника: Наука, Технология, Бизнес 2009 г. (дата обращения 17.01.2021).
11. Колюбакин В. «С-диапазон оставлен спутниковым операторам» - [Электронный ресурс] - 2016 г. сайт\ <https://telesputnik.ru/materials/tsifrovoe-televidenie/article/s-diapazon-ostavlen-sputnikovym-operatoram/> (дата обращения 08.01.2021).

12. «С-диапазон» - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/С-диапазон> (дата обращения 16.01.2021).
13. «Roskill о перспективах мирового рынка галлия до 2020 года» - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.cmmarket.ru/news/1406091418.htm> (дата обращения 02.01.2021).
14. Техническая документация: OMMIC DATASHEET Ultra-low Noise C-band Amplifier CGY2120XUH - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.ommic.com/products>. (дата обращения 06.01.2021).
15. Техническая документация: OMMIC PRODUCT DATASHEET C band High Gain Low Noise Amplifier CGY2178UH - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.ommic.com/> (дата обращения 08.01.2021).
16. Техническая документация: Custom MMIC DATASHEET 4-8 GHz GaN Low Noise Amplifier CMD219 - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.macom.com/LNA> (дата обращения 20.01.2021).
17. Техническая документация: Custom MMIC DATASHEET 4-8 GHz GaN Low Noise Amplifier CMD219C4 - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.macom.com/amplifiers> (дата обращения 13.01.2021).
18. Техническая документация: ANALOG DEVICES DATASHEET GaAs MMIC LOW NOISE AMPLIFIER, 3.5 - 7.0 GHz HMC392A - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.analog.com/en/products/hmc717a.html#product-evaluationkit> (дата обращения 09.01.2021).
19. Техническая документация: ANALOG DEVICES DATASHEET GaAs MMIC LOW NOISE AMPLIFIER, 3.5 - 8.0 GHz HMC392ALC4 - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.analog.com/en/products/hmc717a.html#product-overview> (дата обращения 06.01.2021).
20. Техническая документация: ANALOG DEVICES DATASHEET GaAs pHEMT MMIC LOW NOISE AMPLIFIER, 4.8 - 6.0 GHz, HMC717ALP3E - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.analog.com/en/products/hmc392alc4.html#product-documentation> (дата обращения 15.01.2021).

21. Техническая документация: QORVO DATASHEET Ultra-Low Noise, Bypass LNA, QPL9098 - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.qorvo.com/>. (дата обращения 08.01.2021).

22. Техническая документация: MACOM DATASHEET Low Noise Amplifier 3.5 - 8.0 GHz XL1007-QT – [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.macom.com/LNA> (дата обращения 14.01.2021).