

На правах рукописи

УСОВ Андрей Аркадьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ПРИЕМНО-  
УСИЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ 8-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН  
ВОЛН С ЗАЩИТОЙ ПО ВХОДУ ОТ СИНХРОННЫХ И  
НЕСИНХРОННЫХ СИГНАЛОВ МОЩНОСТЬЮ ДО 1 кВт В ИМПУЛЬСЕ

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2012

Работа выполнена на кафедре радиотехнической электроники Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель:	Доктор технических наук, профессор, Григорьев Андрей Дмитриевич
Официальные оппоненты:	Доктор физ.-мат. наук, профессор Вендик Ирина Борисовна, профессор кафедры МИТ СПбГЭТУ  Доктор технических наук Парнес Михаил Давидович, гл. инженер ОАО «Резонанс», Санкт-Петербург
Ведущая организация:	ОАО «Центральное Конструкторское Бюро Аппаратостроения», г. Тула

Защита состоится « 26 » декабря 2012г. в        час.        мин. на заседании диссертационного совета Д212.238.03 при «Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

Автореферат разослан «        » ноября 2012г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Баруздин С. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В радиолокационных станциях (РЛС) с момента их появления одними из важнейших задач являются задачи усиления колебаний СВЧ и управления ими. Первая задача связана с усилением принимаемого антенной сигнала до величины, необходимой для нормальной работы индикатора РЛС. Вторая задача важна для целей коммутации СВЧ мощности в трактах СВЧ, в частности, для переключения антенны на каналы приемника и передатчика, а так же для ограничения мощности, поступающей в канал приемника, как в режиме передачи, так и в режиме приема

На разных этапах развития РЛС и радиоэлектронной аппаратуры в целом, указанные задачи решались различными способами с применением для указанных целей приборов, основанных на различных физических принципах действия.

При этом с течением времени улучшались качественные характеристики приборов, применяемых для указанных целей, однако сами задачи управления и усиления колебаний СВЧ являются актуальными и в настоящее время. При этом для целей защиты приемника разработан специальный класс приборов, названных защитными устройствами (ЗУ), в который входят как переключатели, так и ограничители. Для целей усиления СВЧ сигналов также разработан целый класс усилителей, в который входят усилители разных типов.

В современных радиолокационных станциях и приемной аппаратуре диапазона СВЧ ЗУ является одним из важнейших электронных элементов СВЧ-тракта. Оно обеспечивает защиту входных цепей приемника от СВЧ-сигналов «собственного» передатчика, сигналов соседних радиолокационных станций и других внешних СВЧ-сигналов, способных вызвать нарушение работы приемного устройства.

Особенно актуальной является задача разработки полупроводниковых малошумящих приемно-усилительных модулей (ПУМ) 8-мм диапазона с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов, так как при традиционной компоновке приемника из отдельных приборов не удается получить приемлемые значения коэффициента шума приемника в целом, что очень важно для современной высокочувствительной аппаратуры. Кроме того, переход на чисто полупроводниковый вариант модуля на порядок повышает быстродействие и долговечность модуля в целом в связи с отказом от входных газоразрядных каскадов защиты.

В настоящее время разработаны полупроводниковые ЗУ сантиметрового диапазона, обладающие весьма высокими параметрами. Однако в миллиметровом диапазоне, несмотря на достигнутый прогресс, не полностью решенными остаются следующие актуальные и практически важные задачи проектирования и конструирования ПУМ: уменьшение сложности изготовления и настройки

малогобаритных ПУМ; оптимизация конструкция входного каскада твердотельного ЗУ в связи с достаточно большой импульсной мощностью на входе модуля; минимизация потерь, вносимых защитным устройством, с целью обеспечения малого коэффициента шума ПУМ; обеспечение малой просачивающейся мощности, что необходимо для надежной работы МШУ; необходимость применения нестандартных технических решений в связи с отсутствием аналогов в 8-мм диапазоне длин волн. Решению вышеперечисленных вопросов и посвящена данная диссертационная работа.

**Цель диссертационной работы.** Разработка полностью твердотельного приемно-усилительного модуля 8-миллиметрового диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов мощностью до 1 кВт в импульсе.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи: разработка оптимальной структурной схемы ПУМ, определение требований к исходным кремниевым и арсенид-галлиевым подложкам для создания монолитных *p-i-n* диодных матриц; определение требований к единичным *p-i-n* диодам, входящим в состав матриц; разработка базовой технологии производства многофункциональных *p-i-n* диодов и монолитных ограничителей на их основе; разработка малошумящего усилителя 8-миллиметрового диапазона длин волн; разработка конструкции и определение основных характеристик твердотельного приемно-усилительного модуля 8-миллиметрового диапазона длин волн.

**Методы исследования.** Решение перечисленных выше задач выполнено с применением: теории СВЧ цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, использования патентных исследований.

**Научная новизна:**

1. Создан полностью твердотельный (полупроводниковый) приемно-усилительный модуль 8-мм диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов мощностью до 1 кВт в импульсе. Такая входная мощность в миллиметровом диапазоне длин волн достигнута впервые. В связи с отказом от входных газоразрядных каскадов защиты долговечность модуля повышена на порядок.

2. Разработан малошумящий усилитель мощности 8-миллиметрового диапазона длин волн с коэффициентом шума не более 2 дБ.

3. Объединение в одном блоке (модуле) защитного устройства и малошумящего усилителя позволяет улучшить качество согласования ЗУ и МШУ и

тем самым уменьшить коэффициент шума модуля. Сокращены также габариты и масса модуля.

**Практическая значимость:** Предложенная конструкция малошумящего приемно-усилительного модуля 8-миллиметрового диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов мощностью до 1кВт и разработанные методики проектирования и изготовления монолитных каскадов защитного устройства используются при разработке специальной аппаратуры в ЗАО "Светлана-Электронприбор".

**Апробация работы.** Диссертационная работа выполнена на кафедре радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских конференциях: «XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике» (Нижний Новгород, п. Хахалы, 2011), «Актуальные проблемы электронного приборостроения», («АПЭП -2010, Саратов, 2010), Всероссийской конференции "Микроэлектроника СВЧЭ (Санкт-Петербург, 2012), 63-й НТК ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертационной работе результатов, положений и выводов подтверждена результатами проведенных теоретических и экспериментальных исследований с применением современных вычислительных средств и измерительной аппаратуры.

**Реализация результатов.** Результаты разработки полупроводникового ограничителя для защиты МШУ и разработки самого МШУ использованы в ОКР «Панцирь-С» и «Панцирь-С1». Разработанные в этих ОКРах приемно-усилительные модули – М45163, М55150, использующие результаты диссертационной работы, успешно поставляются заказчику июня 2010г.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, из них 1 работа – в рекомендуемых ВАК РФ изданиях, 8 – в других статьях и материалах конференций.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа общим объемом 122 страниц состоит из введения, трех глав, заключения, включает 52 рисунка, 8 таблиц, а так же списка используемой литературы из 30 наименований.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Использование управляющего токового сигнала, создаваемого вторым каскадом защитного устройства, позволяет увеличить толщину базы диодов, использованных в первом каскаде (в монолитной кремниевой матрице) без существенного снижения быстродействия ЗУ. Это позволило увеличить

допустимую входную импульсную мощность до 1 кВт и отказаться от газоразрядных каскадов защиты.

2. Использование в выходных каскадах ЗУ балочных *p-i-n*- и детекторных диодов позволяет уменьшить максимальную просачивающуюся мощность на входе МШУ до 10 мВт при увеличении малосигнального затухания не более чем на 0,3 дБ.

3. Показано, что конструктивное объединение ЗУ и МШУ в один модуль позволяет улучшить согласование между его отдельными каскадами и добиться снижения коэффициента шума приемно-усилительного модуля 8-миллиметрового диапазона длин волн до 4 дБ при одновременном снижении массы и габаритов изделия.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и практическая ценность работы.

**Первая глава работы** посвящена аналитическому обзору литературы по устройствам для управления СВЧ колебаний и формулировке решаемых задач.

*Защитное устройство* состоит из одного или нескольких каскадов, выполненных в виде отрезков линии передачи с включенными в них нелинейными элементами (газоразрядными, полупроводниковыми, ферритовыми и др.), которые изменяют свои электрические параметры при превышении некоторого порогового значения воздействующей на них СВЧ-мощности. Защитные устройства используются для защиты приемной аппаратуры дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, применяются в различных видах наземной, морской, авиационной и ракетно-космической техники.

К настоящему времени разработано большое количество типов ЗУ, они существенно отличаются по электрическим параметрам от первых резонансных разрядников. От правильного выбора и эксплуатации ЗУ непосредственно зависит надежность работы приемного устройства и всей аппаратуры в целом. Все это ставит перед разработчиками ЗУ и аппаратуры сложные инженерно-технические задачи.

Полупроводниковое ЗУ представляет собой отрезок СВЧ-линии передачи с включенными в него последовательно или параллельно коммутирующими полупроводниковыми элементами (диодами). Использование полупроводниковых ЗУ способствовало решению задач комплексной миниатюризации антенных приемно-передающих трактов бортовых РЛС. Допустимый уровень входной мощности  $P_{вх}$  этих ЗУ в дециметровом диапазоне достигает сотен киловатт в импульсе, а в миллиметровом диапазоне - сотен ватт. Полупроводниковые ЗУ содержат, как правило, несколько каскадов. Отдельный каскад защиты может быть как многодиодным, например в виде *диодной матрицы* (кремниевое окно) с

включением в поперечное сечение волновода до нескольких десятков и даже сотен диодов, так и однодиодным устройством.

Многодиодный каскад защиты представляет собой отрезок линии передачи, в поперечном сечении которой параллельно или последовательно-параллельно включено несколько, как правило, однотипных  $p-i-n$ -диодов. Выделяющаяся в каскаде СВЧ-мощность при таком включении диодов практически равномерно распределяется между ними. Поэтому многодиодные ЗУ способны рассеять существенно большую среднюю мощность, чем однодиодные. Кроме того, при последовательно-параллельной схеме включения диодов имеется возможность использования полупроводниковых структур с меньшей толщиной  $i$ -слоя, чем в однодиодных ЗУ в одних и тех же электрических режимах, обеспечивая тем самым более высокое быстродействие. Так, для  $p-i-n$ -диодной квадратной матрицы с  $n$ -элементами уменьшение толщины  $i$ -слоя и площади единичной полупроводниковой структуры в  $n$  раз по сравнению с однодиодным ЗУ обеспечивает снижение времени восстановления в  $n$  раз при сохранении максимально допустимой входной импульсной мощности, потерь пропускания, рабочей полосы частот и долговечности. При этом уровень максимально допустимой входной средней мощности увеличивается в  $n^2$  раз.

В настоящее время разработаны полностью твердотельные ЗУ сантиметрового диапазона с входной мощностью до 10 кВт. Однако при переходе на более высокие частоты использованные решения оказываются неприемлемыми из-за больших паразитных параметров диодов и схемы. Поэтому для разработки ЗУ 8-мм диапазона, не уступающего по параметрам аналогичным устройствам сантиметрового диапазона, необходимо решить ряд новых научных и практических задач:

1. Выбор и оптимизация конструкции и технологии изготовления входного каскада твердотельного ЗУ в связи с достаточно большой импульсной мощностью на входе модуля.
2. Разработка способов увеличения быстродействия ЗУ.
3. Минимизация потерь, вносимых защитным устройством, с целью обеспечения малого коэффициента шума ПУМ.
4. Обеспечение малой просачивающейся мощности, что необходимо для надежной работы МШУ.

**Вторая глава** работы посвящена аналитическому обзору литературы по устройствам для усиления колебаний СВЧ мощности.

МШУ позволяют ценой относительно небольшого усложнения схемы и увеличения размеров и веса аппаратуры существенно повысить чувствительность приемника (снизить коэффициент шума) и тем самым увеличить дальность действия РЛС. Это особенно важно для бортовых РЛС, где возможности

увеличения мощности передатчика и размеров антенны для повышения дальности часто ограничены заданными массой и размерами аппаратуры. В настоящее время в МШУ РЛС применяются, как правило, транзисторные усилители, имеющие достаточно малый уровень шума и высокую надежность.

На рис. 1 показана простейшая структурная схема однокаскадного усилителя СВЧ. Усилительный прибор представлен в виде четырехполюсника, описываемого *волновой матрицей рассеяния* (системой  $S$  – параметров). Эти параметры могут быть определены методом измерения падающих и отраженных волн или рассчитаны по известным  $Y$ -параметрам усилительного прибора.

### Усилитель

согласуется по входу и выходу с источником сигнала и с нагрузкой ( $R_{\Gamma}=\rho_0, R_{\text{н}}=\rho_0$ ). Реальные входной и выходной СВЧ тракты имеют в режиме согласования с источником сигнала и с нагрузкой волновые сопротивления порядка 50 Ом, которые отличаются от значений, необходимых для нормальной работы транзистора. Поэтому усилитель должен включать в себя согласующие цепи СЦ1 и СЦ2, трансформирующие значения сопротивлений.

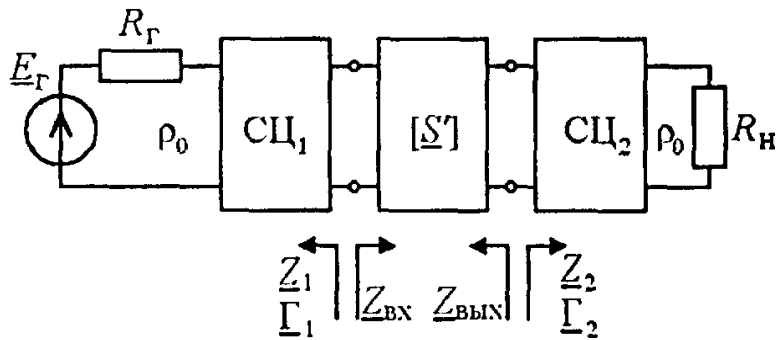


Рис. 1. Структурная схема однокаскадного усилителя

Важнейшими параметрами транзисторного усилителя СВЧ являются его *коэффициент усиления, устойчивость и коэффициент шума в заданной полосе частот*. Для достижения минимального коэффициента шума согласующие цепи МШУ должны иметь *минимум активных потерь*, поэтому их строят на реактивных элементах, как правило, с распределенными параметрами.

Типичная схема однокаскадного узкополосного малошумящего усилителя на полевом транзисторе с затвором Шоттки показана на рис. 2. Транзистор включен по схеме с общим истоком. Цепь согласования СЦ1 образована отрезками микрополосковых линий длиной  $l_1, l_2$ , согласующая цепь СЦ2 - отрезками  $l_3, l_4$ . В общем случае волновые сопротивления линий не одинаковы, отрезки  $l_1, l_3$  образуют короткозамкнутые шлейфы. Стабилизирующее сопротивление  $R_{\text{ст}}$  по высокой частоте подключено параллельно выходным зажимам

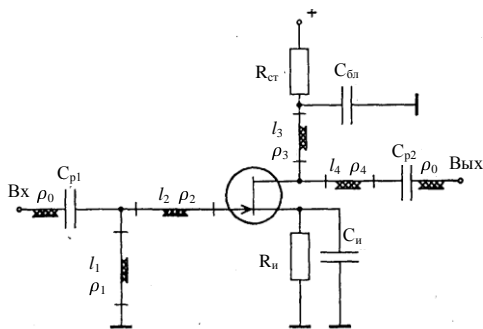


Рис. 2. Схема однокаскадного узкополосного МШУ



транзистора.

Поскольку коэффициент усиления транзистора уменьшается с ростом частоты, вопросы согласования в широкополосных усилителях решают на верхней частоте рабочего диапазона. Возникающее при этом избыточное усиление на нижних частотах устраняется реактивными или диссипативными (поглощающими) выравнивающими цепями.

В настоящее время транзисторные малошумящие усилители СВЧ изготавливаются преимущественно в виде *гибридных интегральных микросхем* с навесными корпусными и бескорпусными активными элементами. Усилители в виде *полупроводниковых интегральных микросхем* уступают гибридным по шумовым показателям и повторяемости параметров.

**Третья глава** посвящена разработке монолитного полупроводникового ограничителя мощности 8-миллиметрового диапазона длин волн, предназначенный для работы при входной импульсной мощности до 1 кВт.

В монолитных полупроводниковых защитных устройствах, разрабатываемых на основе многодиодных матриц, СВЧ мощность распределяется в сечении волноводного тракта между большим количеством управляемых дискретных *p-i-n* диодов, что дает возможность резко увеличить импульсную и среднюю мощность при сохранении высокого быстродействия, определяемого быстродействием единичных *p-i-n* диодов. При этом на порядок по сравнению с газоразрядными защитными устройствами увеличивается долговечность. Таким образом, монолитные многодиодные полупроводниковые защитные устройства позволяют преодолеть принципиальные трудности, возникающие в миллиметровом диапазоне в газоразрядных защитных устройствах и обеспечить большую долговечность и высокое быстродействие.

В ходе диссертационной работы проведена разработка конструкции полупроводниковых ограничителей 8-мм диапазона на основе *p-i-n* диодных матриц. В этих устройствах полупроводниковая подложка со сформированной на ней СВЧ схемой располагается поперек сечения волновода.

Исходная подложка для монолитных *p-i-n* диодных матриц должна быть прозрачна для проходящей СВЧ мощности и обеспечивать технологическую возможность создания на ее базе СВЧ схемы в виде монолитной многодиодной матрицы для управления проходящей через подложку мощностью.

Наиболее приемлемыми для создания монолитных СВЧ схем являются подложки из монокристаллов *Si* и *GaAs*. В их объеме и на поверхности методами травления, окисления, диффузии, эпитаксии, напыления и другими технологическими методами формируются СВЧ микросхемы.

Параметры СВЧ микросхем, изготовленных на базе полупроводниковых подложек, очень сильно зависят от состояния поверхности последних. Качество

поверхности подложек определяется ее микрорельефом (шероховатостью), кристаллическим совершенством поверхностных слоев и степенью физико-химической чистоты. Высокие требования предъявляются и к обратной, нерабочей, стороне подложки. Неодинаковая и неравноценная обработка обеих сторон подложки приводит к дополнительным остаточным механическим напряжениям и деформации кристалла, что обуславливает изгиб пластины.

Как правило, подложки, выпускаемые промышленностью, имеют ориентацию  $\langle 100 \rangle$ , что неприемлемо для формирования на их основе монокристаллических матриц с качественным рельефом. Применение кремния с ориентацией  $\langle 110 \rangle$  позволяет после травления получить канавку (а, следовательно, и рельеф самой СВЧ схемы) прямоугольного сечения, в то время как склоны канавки в случае кремния с ориентацией  $\langle 100 \rangle$  являются наклонными, что приводит при формировании  $p$ - и  $n$ -переходов  $p$ - $i$ - $n$  диодов в канавках к нестабильности параметров единичных диодов матрицы. Поэтому для разработки монокристаллических  $p$ - $i$ - $n$  диодных матриц на основе кремния следует использовать подложки с ориентацией  $\langle 110 \rangle$ .

В диссертационной работе для создания GaAs  $p$ - $i$ - $n$  диодных матриц были использованы зарубежные подложки фирмы Friberg (Германия), эпитаксиальные  $i$ -области на которых выращивались в ОАО «Элма-Малахит», г. Зеленоград.

С целью определения пригодности выбранных подложек для создания монокристаллических  $p$ - $i$ - $n$  диодных матриц для переключателей и ограничителей была проведена экспериментальная проверка прозрачности (вносимых потерь) выбранных подложек Si и GaAs в 8-мм диапазоне частот. Проверка производилась на образцах подложек Si и GaAs толщиной 200 мкм при включении последних в волноводные резонансные диафрагмы 8-мм диапазона (сечение тракта 7,2 x 3,4 мм). В результате испытаний нескольких партий подложек выяснилось, что зарубежные подложки из арсенида галлия в 8-мм диапазоне вносят потери 0,4...05 дБ, а отечественные – 2,5...3,0 дБ, т. е. в 5-6 раз больше и не пригодны для изготовления монокристаллических многодиодных матриц.

Переключатель (ограничитель) на основе монокристаллической многодиодной структуры представляет собой полупроводниковое окно, расположенное поперек сечения волновода. На окне сформирована многодиодная матрица из последовательно-параллельно включенных диодов. Упрощенная конструкция матрицы из 16 диодов приведена на рис.3. Приведенной конструкции соответствует электрическая схема включения диодов, показанная на рис. 4.

По цепи управления все диоды включены параллельно, а по СВЧ – параллельно-последовательно (4 столбца по 4 диода в каждом столбце). В реальных конструкциях число диодов значительно больше и составляет десятки и

даже сотни диодов, особенно в переключателях, рассчитанных для работы при повышенных значениях средней и импульсной мощности.

Для надежной работы матрицы в составе ограничителя необходимо чтобы рассеиваемая в единичных диодах мощность не превышала предельно допустимой для диодов величин. Особенно это важно для входных каскадов ограничителя, работающих при максимальных входных мощностях.

В результате анализа и макетирования была выбрана конструкция ограничителя, содержащая две связанных между собой по постоянному току матрицы на Si *p-i-n* диодах и на GaAs *p-i-n* диодах. Каждая матрица содержит 64 диода (8 столбцов по 8 диодов в каждом столбце), при этом 4 диода в каждом

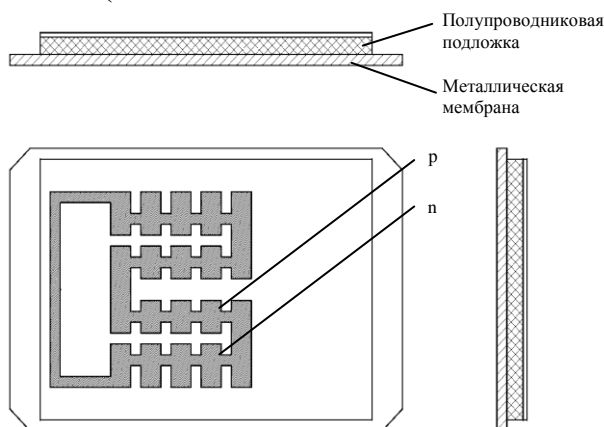


Рис. 3. Упрощенная конструкция монолитной многодиодной матрицы

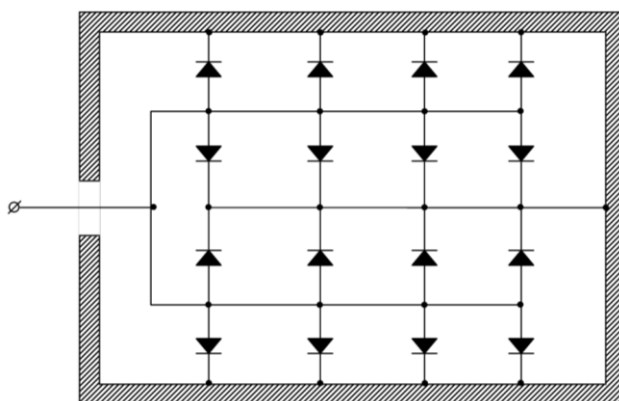


Рис.4 Схема включения *p-i-n* диодов в полупроводниковой матрице из 16 диодов

столбце по постоянному току включены навстречу друг другу, а средние точки столбцов каждой матрицы соединены между собой и со средними точками столбцов другой матрицы. Полярность включения диодов в одноименных столбцах указанных матриц обратная по отношению друг к другу.

Конструкция ограничителя схематично приведена на рис. 5,а, а ее эквивалентная схема – на рис. 5,б. Пластина 1 с матрицей из Si *p-i-n* диодов располагаются первой по ходу мощности, пластина 2 с матрицей из GaAs диодов располагается за ней на электрическом расстоянии равном четверти длины волны в волноводе. Настройка ограничителя на заданную рабочую частоту осуществляется с помощью компенсирующих индуктивных элементов 3, 4 в виде металлических полосок.

В предложенной конструкции увеличение рабочей мощности обеспечивается за счет первой, кремниевой, матрицы, в которой применены достаточно мощные *p-i-n* диоды с толщиной базы 10 мкм. Малая величина просачивающейся мощности обеспечивается за счет подпитки диодов первой матрицы постоянным током, вырабатываемым диодами второй, арсенид-галлиевой,

матрицы, при этом вторая матрица одновременно выполняет роль второго каскада ограничителя.

В рамках диссертационной работы с целью повышения эффективности и надежности работы ограничителя в режимах с короткой длительностью импульса обе матрицы были выполнены по двухполупериодной схеме, а именно, все четные столбцы в обеих матрицах, согласно рис. 5.б имели отрицательную полярность по сравнению с нечетными столбцами. Это позволяет избежать выхода ограничителя из строя при большой входной мощности, когда первая Si-матрица детектирует сигнал и выпрямленный ток первой матрицы частично компенсирует ток второй,

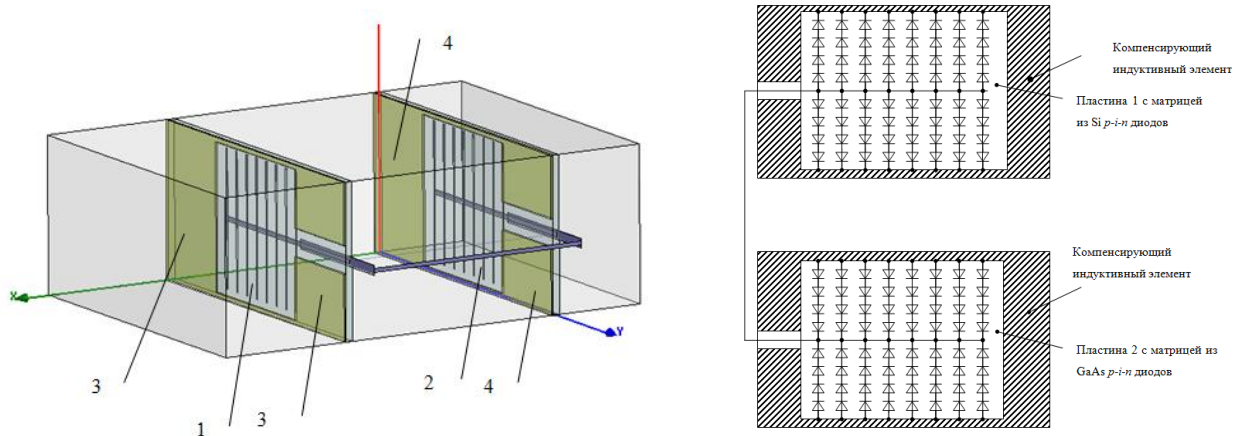


Рис. 5. Схематичная конструкция ограничителя на основе монокристаллических Si и GaAs матриц (а) и ее эквивалентная схема (б).

встречно включенной, GaAs-матрицы, в результате чего матрицы могут оказаться обесточенными (или слабо запитанными) и выйдут из строя.

Разработанный монокристаллический полупроводниковый ограничитель 8-мм диапазона на уровень входной импульсной мощности до 1 кВт имеет следующие основные электрические параметры:

— рабочая полоса частот, %	6
— потери пропускания, дБ	1,4
— максимальная просачивающаяся мощность, Вт	1,1
— время восстановления по уровню 3 дБ при длительности импульса 1 мкс, нс	200

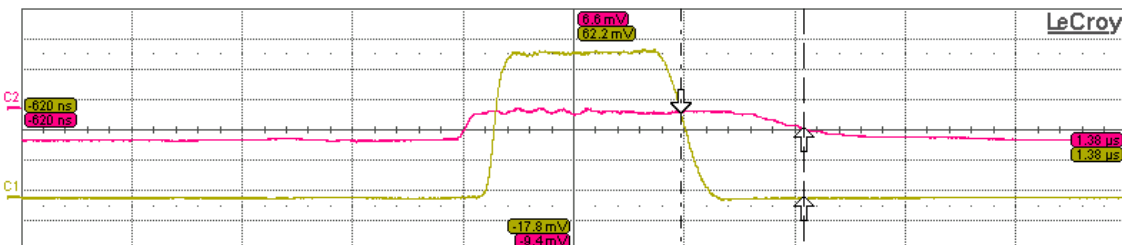


Рис. 6. Осциллограмма входного (кривая C1) и зондирующего (кривая C2) импульсов

На рис. 6 показана осциллограмма входного импульса (кривая C1) и зондирующий сигнал на выходе ЗУ (кривая C2). Как видно, время восстановления ограничителя,

измеренное по стандартному уровню 3 дБ при длительности импульса 1 мкс составляет 200 нс, что удовлетворяет техническим требованиям.

Конструкция волноводного ограничителя (переключателя) на базе монолитной многодиодной структуры приведена на рис. 8. Конструктивно прибор состоит из двух фланцев (1) и (2) и корпуса (3), в котором размещены две идентичные монолитные полупроводниковые структуры (4) и (5), разделенные четвертьволновым металлическим вкладышем (6). Аналогичные вкладыши размещены между полупроводниковыми структурами и фланцами. Входной и выходной фланцы содержат герметизирующие окна (7, 8) из полиамидной пленки, при этом для лучшего согласования с волноводным трактом электрическое расстояние от герметизирующих окон до монолитных полупроводниковых структур выбрано равным  $\lambda_v/4$ , где  $\lambda_v$  – длина волны в волноводе, соответствующая средней частоте рабочего диапазона.

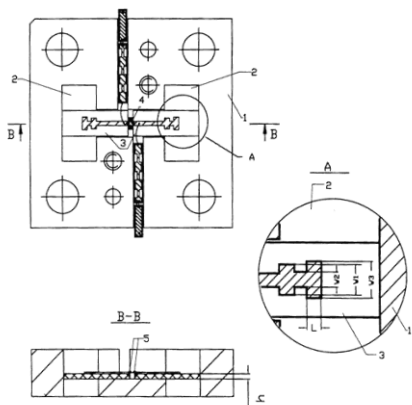


Рис. 7. Конструкция прототипа МШУ

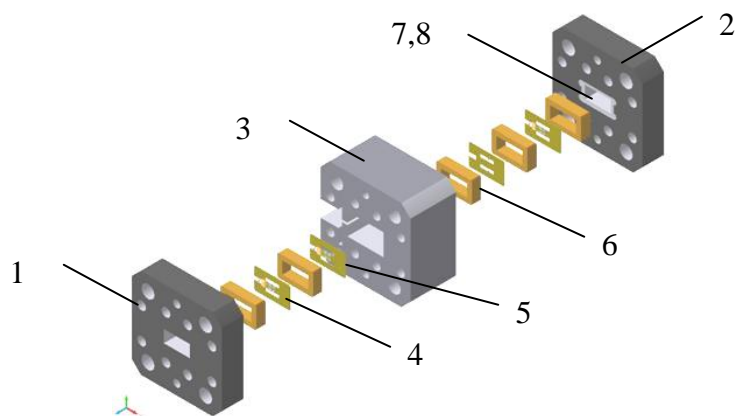


Рис. 8. Конструкция волноводного переключателя (ограничителя) на базе монолитной многодиодной

**Четвертая глава** посвящена разработке малошумящего усилителя 8-мм диапазона длин волн и рассмотрению возможности создания на основе выше изложенного материала твердотельного приемно-усилительного модуля 8-мм диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов мощностью до 1кВт в импульсе.

Малошумящий усилитель является наиболее важным каскадом, входящим в приемно-усилительный модуль, т.к. определяет коэффициент шума и коэффициент усиления приемно-усилительного модуля.

В качестве прототипа для расчета и оптимизации схемы МШУ была выбрана схема, предложенная «НПП «Пульсар» в патенте на изобретение<sup>1</sup>. В нем представлена интегральная микросхема, содержащая основание с волноводными

<sup>1</sup> Менненбаев В.М., Дорофеев А.А. Патент РФ № 2206940 от 20.06.2003. "Интегральная микросхема КВЧ диапазона"

каналами, микрополосковые платы без обратной металлизации, выступающие в волноводные каналы перпендикулярно широкой стенке волновода, и кристалл транзистора, установленный в разрыв между микрополосковыми платами и соединенный с ними проволочными проводниками. В этой микросхеме отсутствует обратная металлизация МПЛ, что снижает потери СВЧ сигнала. Но измененная (упрощенная) конфигурация лицевой металлизации МПЛ в области волноводного окна приводит к потерям полезного сигнала и сужению рабочего диапазона частот.

Конструкция прототипа показана на рис. 7. МШУ состоит из основания 1 с волноводными окнами 2, двух микрополосковых плат 3 без обратной металлизации, выступающих в волноводные каналы перпендикулярно широкой стенке волновода, и кристалла транзистора 4, установленного между полосковыми платами и соединенным с ними проволочками 5. Лицевая сторона в области волноводных окон имеет конфигурацию в виде скачков ширины МПЛ. Для центральной частоты 34 ГГц и кварцевой подложки с  $\epsilon_r=3,8$  и  $h=0,2$  мм длина каждого скачка  $L = 0,45$  мм, ширина металлизации скачков  $W_1 = 0,8$  мм,  $W_2 = 0,4$  мм,  $W_3 = 1,2$  мм.

Для улучшения согласования МШУ с разработанным ЗУ в заданной полосе частот была проведена оптимизация его размеров, что позволило уменьшить КСВ в до приемлемых значений. Значения размеров до и после оптимизации приведены в таблице.

Таблица

Данные патента	Данные диссертации
$L = 0.45$ мм	$L_1 = 0.43$ мм; $L_2 = 0.46$ мм; $L_3 = 1.1$ мм
$W_1 = 0.8$ мм	$W_1 = 0.53$ мм
$W_2 = 0.4$ мм	$W_2 = 0.29$ мм
$W_3 = 1.2$ мм	$W_3 = 1.1$ мм
$\epsilon_r=3,8$ и $h=0,2$ мм	$\epsilon_r=3,8$ и $h=0,2$ мм

Частотные зависимости КСВН до и после оптимизации представлены на рис. 9.

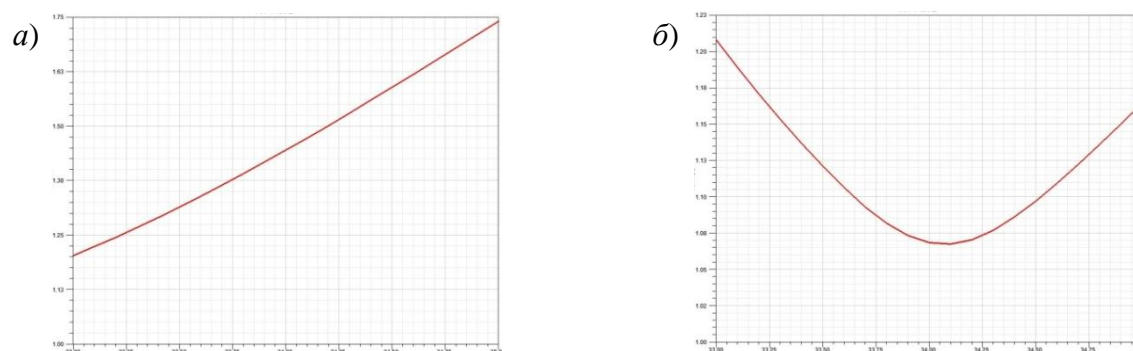


Рис. 9. Частотные зависимости патентного образца (а) и оптимизированного усилителя (б).

Вид волноводной части разработанного усилителя представлен на рис. 10,а,

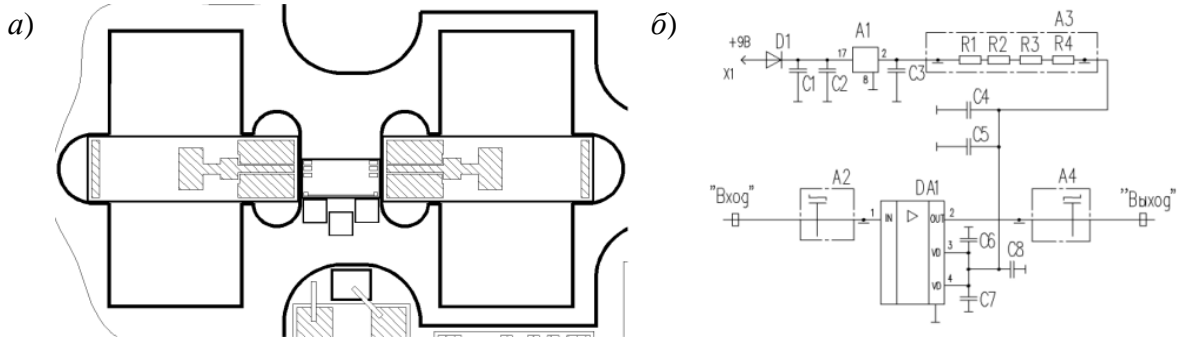


Рис. 10. Вид волноводной части МШУ (а) и его электрическая схема (б).

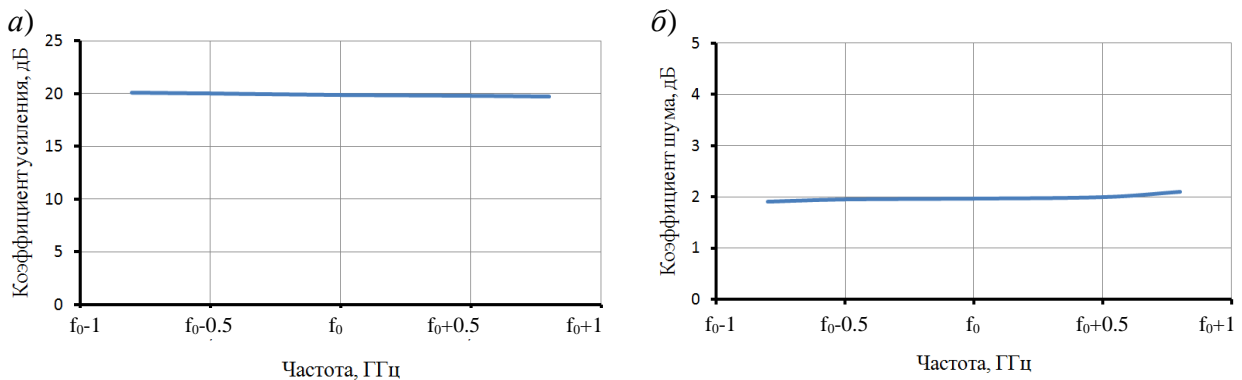


Рис. 11. Зависимость коэффициентов усиления (а) и шума (б) МШУ от частоты.

его электрическая схема – на рис. 10,б, а частотные характеристики – на рис. 11.

Оптимизация параметров ЗУ и МШУ позволила разработать приемно-усилительный модуль 8-мм диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных помех с импульсной мощностью до 1 кВт. Характеристики модуля, показанные на рис. 12, находятся на уровне лучших аналогичных устройств сантиметрового диапазона.

Полученные результаты показывают возможность разработки полностью твердотельного приемно-усилительного модуля 8-мм диапазона с уровнем защиты по входу от синхронных и несинхронных сигналов мощностью до 1 кВт в импульсе. При этом долговечность разработанных модулей на порядок превышает долговечность ранее разработанных модулей, использующих для защиты резонансные разрядники.

Особенно следует отметить

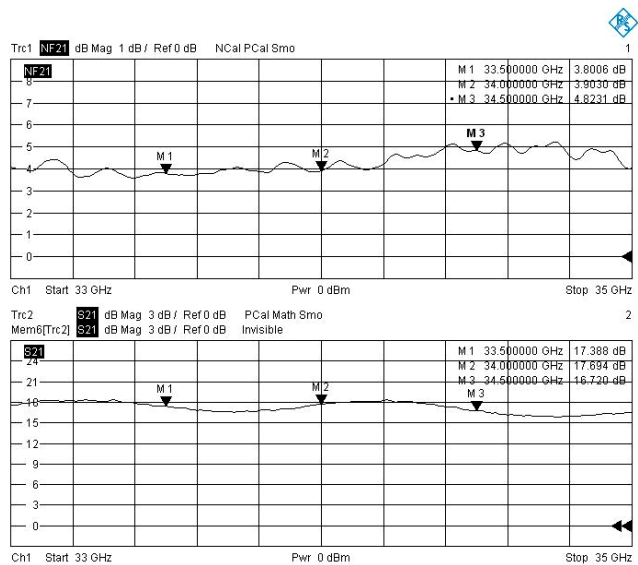


Рис.12. Коэффициенты шума и усиления ППМ

достаточно высокий уровень защиты входа МШУ от синхронных и несинхронных сигналов (1000 Вт импульсной и 1 Вт средней мощности соответственно). При этом максимальная импульсная мощность на выходе модуля не превышает 10 мВт при обеспечении высокого быстродействия 0,2 мкс.

### Основные результаты и выводы

1. Разработаны входные монолитные каскады твердотельного защитного устройства 8-миллиметрового диапазона длин волн на монолитных кремниевых и арсенид-галлиевых *p-i-n*-диодных матрицах, предназначенного для работы при входной импульсной мощности до 1 кВт;

2. Разработаны выходные каскады твердотельного защитного устройства на базе балочных *p-i-n* и детекторных диодах, с выходной импульсной мощностью 10 мВт;

3. Разработан малошумящий усилитель мощности 8-миллиметрового диапазона длин волн с коэффициентом шума не более 2 дБ;

4. Показано, что за счет улучшения согласования между отдельными каскадами, входящими в состав модуля узлов, можно добиться оптимизации параметров приемно-усилительного модуля 8-миллиметрового диапазона длин волн.

5. Использование управляющего сигнала (тока) создаваемого вторым каскадом защитного устройства (монолитной арсенид-галлиевой матрицей) позволяет увеличить толщину базы диодов использованных в первом каскаде (монолитной кремниевой матрице) и тем самым увеличить допустимую входную импульсную мощность до 1 кВт и отказаться от газоразрядных каскадов защиты;

6. В качестве второго каскада защитного устройства целесообразно использовать монолитную арсенид-галлиевую матрицу на *p-i-n* диодах с толщиной базы 2-3 мкм и высоким быстродействием, которая позволяет уменьшить порог срабатывания защитного устройства;

7. Для нормальной работы малошумящего усилителя необходимо использование двух дополнительных каскадов защитного устройства на балочных *p-i-n* диодах и диодах с барьером Шотки.

8. Объединение в одном блоке (модуле) защитного устройства и малошумящего усилителя позволяет улучшить качество согласования, сократить габарит и уменьшить массу и уменьшить коэффициент шума модуля.

9. Установлено, что при использовании защитного устройства и малошумящего усилителя описанного в диссертации, возможно создать комплексированный малошумящий приемно-усилительный модуль 8-миллиметрового диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и



несинхронных сигналов мощностью до 1кВт, имеющий коэффициент шума не более 4 дБ.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

***В изданиях, рекомендованных ВАК РФ***

1. Усов.А.А. Монолитный автономный полупроводниковый ограничитель мощности 8-мм диапазона длин волн, предназначенный для работы при входной импульсной мощности до 1 кВт / А.А. Усов, А.В. Кириллов, В.А. Смирнов // Известия высших учебных заведений России «Радиоэлектроника». 2012. 1'2012. С. 105-108.

***В других изданиях***

2. Усов А.А. Полупроводниковый малошумящий приемно-усилительный модуль 8-мм диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов / А.А. Усов, А.В. Кириллов, В.А. Смирнов // Известия Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета «ЛЭТИ». 2009. 7/2009. С. 3-6.
3. Усов А.А. Разработка защитных устройств малошумящих усилителей миллиметрового диапазона. / А.Д. Григорьев, А.В. Кириллов, А.А. Усов // Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, 63-я НТК ППС, изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. С. 43-49.
4. Усов А.А. Монолитный автономный полупроводниковый ограничитель мощности 8-мм диапазона длин волн, предназначенный для работы при входной импульсной мощности до 1 кВт / А.В. Кириллов, В.А. Смирнов, А.А. Усов // Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике. ФГУП «НПП «Салют» // 2011. С. 76-79.
5. Усов А.А. Твердотельный малошумящий приемно-усилительный модуль 8-мм диапазона с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов мощностью до 1 кВт в импульсе. / А.В. Кириллов, В.А. Смирнов, А.А. Усов, Р.Г Шифман // Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике. ФГУП «НПП «Салют», 2011. С. 118-120.
6. Усов А.А. Твердотельный (полупроводниковый) приемно-усилительный модуль 8-мм диапазона длин волн с защитой по входу от синхронной и асинхронной помехи мощностью до 1 кВт в импульсе / А.В. Кириллов, А.А. Усов, А.Д. Григорьев.// Материалы трудов всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ», 2012. С. 97-101.
7. Усов А.А. Монолитный автономный полупроводниковый ограничитель мощности 8-мм диапазона длин волн, предназначенный для работы при входной импульсной мощности до 1 кВт / А.В. Кириллов, А.А. Усов.//

Материалы НТК №67, посвященной Дню радио, изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.

8. Усов А.А. Монолитный ограничитель мощности миллиметрового диапазона / А.Д. Григорьев, А.В. Кириллов, А.А. Усов.// Материалы конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», 2010. С. 128-133.
9. Усов А.А. Полупроводниковый малошумящий приемно-усилительный модуль 8-мм диапазона длин волн с защитой по входу от синхронных и несинхронных сигналов / А.В. Кириллов, В.А. Смирнов, А.А. Усов // Материалы НТК №62, посвященной 40-летию Научно-исследовательской лаборатории СВЧ-микроэлектроники, 2009. С. 26-27.