

На правах рукописи

УДК: 621.385.69

Быковский Сергей Васильевич

ЦИКЛОТРОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА
ПРИЕМНИКОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Специальность 2.2.1

«Вакуумная и плазменная электроника»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Фрязино 2021

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»

Официальные оппоненты:

Пирогов Юрий Андреевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Царев Владислав Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина.

Масленников Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов», г. Москва.

Ведущая организация:

АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов.

Защита состоится 21 апреля 2022 года в 14 часов на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина» по адресу: 141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а, корп. 1, Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НПП «Исток» им. Шокина» <http://science.istokmw.ru/avtoreferati-dissertaciy/>

Автореферат разослан 2 февраля 2022 года.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук



Куликова И.В.

Общая характеристика работы

Защитные устройства (ЗУ) приемников радиолокационных систем (РЛС) предназначены для предохранения входных высокочувствительных усилительных каскадов приемников от выхода из строя при воздействии сверхвысокочастотной (СВЧ) мощности высокого уровня, которая может поступать на вход приемника РЛС как от своего передатчика, так и через антенну от внешних посторонних источников излучений. ЗУ является первым входным каскадом приемника.

В диссертационной работе рассматриваются автономные ЗУ, т.е. устройства, которые переходят из режима пропускания сигнала в режим защиты и обратно без управляющего сигнала, в зависимости от уровня поступающей на вход СВЧ мощности. Обеспечить надежную защиту приемников РЛС от внешних источников СВЧ мощности, а, следовательно, от средств радиоэлектронного подавления способны лишь устройства подобного типа.

Существуют различные типы ЗУ приемников РЛС, обзорная информация по ним приведена в главе 1. Основные недостатки существующих ЗУ – это значительный пик просачивающейся на выход СВЧ мощности, обусловленный некоторой задержкой (временем срабатывания) перехода устройства из режима пропускания сигнала в режим защиты. Несмотря на малую длительность пик просачивающейся мощности может приводить к выходу из строя последующих каскадов приемника. Другой недостаток связан с недостаточно малым временем восстановления ЗУ при переходе его из режима защиты в режим пропускания сигнала.

Настоящая работа посвящена циклотронным защитным устройствам (ЦЗУ). Наиболее часто ЦЗУ применяются в аппаратуре приемников РЛС в составе циклотронно-защищенных комплексированных усилителей (ЦЗКУ), при этом ЦЗУ является определяющим элементом ЦЗКУ.

Актуальность работы. Тенденции в развитии современных радиолокационных систем смещаются в сторону использования различных типов зондирующих импульсов со сложным фазовым и частотным наполнением, в том числе квазинепрерывных, с уровнями мощности, как правило, не более нескольких десятков киловатт. При этом обеспечение дальности действия РЛС, распознавание целей на фоне побочных отраженных излучений, определение параметров целей решаются за счет специальной обработки принимаемых отраженных

сигналов, повышения чувствительности приемников, обеспечения максимальной линейности их входных каскадов.

Для решения подобных задач, помимо общей устойчивости защитных устройств к входной мощности, становятся исключительно важными такие параметры как сверхмалое время восстановления, отсутствие пиков просачивающейся мощности, высокий уровень границы амплитудной линейности, высокая фазовая линейность. По перечисленным параметрам циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) выгодно отличаются от других типов ЗУ.

Одно из наиболее ценных качеств ЦЗУ – сверхмалое время восстановления параметров после окончания импульса входной СВЧ мощности, данный параметр составляет не более 10...30 нс. Это позволяет организовать работу РЛС с малой длительностью и малой скважностью передаваемых импульсов, в квазинепрерывном режиме, что соответствует требованиям разработчиков современных РЛС.

Еще одно важное свойство ЦЗУ – высокое качество защиты последующих каскадов, которое выражается в отсутствии пиков просачивающейся мощности. В совокупности с верхней границей линейности ЦЗУ на уровне 1...5 мВт и переходом в режим защиты при увеличении входной мощности еще на 3...5 дБ, ЦЗУ обеспечивают надежную и качественную защиту последующих полупроводниковых каскадов, использующих в том числе маломощные НЕМТ-транзисторы.

ЦЗУ помимо прочего выполняет функцию частотного преселектора, ослабляя побочные каналы приема в приемных устройствах РЛС.

В диапазоне частот от 2 ГГц до 15 ГГц ЦЗУ допускают работу с входной импульсной мощностью до 10 кВт при средней мощности до 250...300 Вт без принятия мер по принудительному охлаждению устройства. В диапазоне частот 2...3 ГГц – до 50 кВт импульсной мощности при жидкостном охлаждении и до 200 кВт импульсной мощности при работе с короткими импульсами.

Циклотронные защитные устройства по совокупности основных электрических параметров превосходят существующие в настоящее время защитные устройства других типов.

По указанным причинам на сегодняшний день ЦЗУ нашли широкое применение в приемниках РЛС современных систем различного назначения, а также в разрабатываемых и проектируемых в настоящее время комплексах. При этом существует настоятельный

запрос со стороны разработчиков РЛС на дальнейшее совершенствование и модернизацию ЦЗУ.

Таким образом, создание циклотронных защитных устройств представляет собой важное научное, техническое и технологическое решение, внедрение которого в практическую аппаратуру вносит значительный вклад в развитие радиолокационной техники специального назначения, в обеспечение оборонного потенциала страны.

Данный тезис позволяет утверждать, что разработка и исследование ЦЗУ (включая ЦЗКУ) являются актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является создание нового типа электронно-лучевых малошумящих СВЧ приборов О-типа с поперечным взаимодействием – циклотронных защитных устройств.

Для достижения поставленной цели в ходе работы необходимо было решить следующие **основные задачи**:

- 1) Исследовать и проанализировать принципы работы ЦЗУ, выявить физические основы, обуславливающие преимущества ЦЗУ перед другими типами устройств аналогичного назначения, специфические особенности устройств.
- 2) Разработать и исследовать серию циклотронных защитных устройств в диапазоне частот от 2 ГГц до 15 ГГц.
- 3) Найти оптимальные конструктивные решения для ЦЗУ в зависимости от особенностей их параметров и применения.
- 4) Содействовать внедрению ЦЗУ и комплексированных усилителей на их основе (ЦЗКУ) в модернизируемые и вновь разрабатываемые РЛС, освоению серийного производства ЦЗУ / ЦЗКУ.
- 5) Рассмотреть и предложить основные перспективные направления дальнейшего развития ЦЗУ.

Объектом исследования в настоящей работе является новый представитель класса электронно-лучевых малошумящих СВЧ приборов О-типа с поперечным взаимодействием, работа которых основана на возбуждении и взаимодействии с быстрой циклотронной волной (БЦВ) электронного луча, – циклотронное защитное устройство. Представителем данного класса приборов на раннем этапе развития являлся электронно-лучевой параметрический усилитель (ЭПУ), затем – электростатический усилитель (ЭСУ), в настоящее время – ЦЗУ. Релятивистские эффекты в приборах данного класса пренебрежимо малы.

Предмет исследования – физические принципы работы ЦЗУ, конструктивно-технологические решения, комплекс электрических параметров, специфика использования устройства в аппаратуре приемников РЛС.

Методы исследования. При выполнении работы использованы следующие методы: аналитическое рассмотрение принципов преобразования и взаимодействия поперечных волн электронного луча с резонаторными структурами, применение компьютерных пакетов программ 3D моделирования высокочастотных структур, использование радиоизмерительного оборудования и стандартных методик для исследования электрических параметров ЦЗУ. Определяющим явился опыт разработки приборов типа ЭСУ и ЦЗУ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов достигалась использованием апробированных физических аналитических моделей, применением общепризнанных пакетов программ моделирования, измерением электрических параметров разработанных и изготовленных образцов ЦЗУ, в том числе в составе приемников РЛС, подтверждалась опытом их эксплуатации.

Научная новизна данной работы обусловлена тем, что направление ЦЗУ – это оригинальное направление в вакуумной электронике СВЧ, существующее и развивающееся на единственном предприятии в России и в мире – АО НПП «Исток» им. Шокина». Исследование, анализ и обоснование комплекса параметров и характеристик ЦЗУ, их взаимосвязь и зависимость от конструктивно-технологических особенностей, а также разработка и внедрение в аппаратуру потребителей серии ЦЗУ (ЦЗКУ) в диапазоне частот от 2 ГГц до 15 ГГц, – все это подтверждает состоятельность ЦЗУ, как научно-технического направления в вакуумной СВЧ электронике, содержит несомненную научную новизну.

Практическая значимость настоящей работы связана прежде всего с широким внедрением разработанных ЦЗУ и ЦЗКУ в ряд современных радиолокационных систем наземного, морского, авиационного, а также космического базирования.

За двадцать лет было разработано 20 типов ЦЗКУ и 4 типа ЦЗУ, из которых 18 типов устройств в настоящее время производятся серийно. Несколько новых ЦЗКУ находятся на этапе внедрения в РЛС, разработка которых не завершена.

Разработанные устройства поставляются двенадцати предприятиям радиотехнического и радиолокационного профиля. Выполнены три экспортных контракта по разработке ЦЗКУ и приемника РЛС с использованием ЦЗУ.

Всего было выпущено за 20 лет более 5 тысяч ЦЗКУ, а также более 3,5 тысяч ЦЗУ.

Положения, выносимые на защиту

1) Разработана и реализована концепция циклотронных защитных устройств приемников РЛС СВЧ диапазона, по комплексу основных электрических параметров превосходящих отечественные и зарубежные аналоги.

Содержание концепции изложено в виде основных выводов по работе, приведенных в Заключении.

2) В ЦЗУ принципиально отсутствует пик просачивающейся на выход СВЧ мощности, характерный для других типов ЗУ, что обусловлено конструктивным разделением входной и выходной ВЧ линий устройства, связь между которыми осуществляется через электронный луч в пределах его энергетической емкости.

3) Время восстановления ЦЗУ определяется преимущественно добротностью входного резонатора и рабочей частотой и в диапазоне длин волн 3 см составляет приблизительно 10 нс.

4) Линейность амплитудной характеристики ЦЗУ в режиме передачи сигнала нарушается лишь за счет оседания электронов луча на стенках пролетного канала, при этом верхняя граница линейности амплитудной характеристики ЦЗУ диапазона длин волн 3 см по уровню компрессии коэффициента передачи 1 дБ составляет 1...5 мВт по входной мощности.

5) Образование шумового пика в ЦЗУ связано с увеличением в луче количества рассеянных электронов, при этом сам факт появления шумового пика и частота, на которой он фиксируется, зависят от следующих факторов: диапазона рабочих частот, величины зазора резонатора, потенциала дрейфа луча, плотности пространственного заряда луча.

6) Увеличение электронной нагрузки резонаторов ЦЗУ и, соответственно, расширение рабочей полосы частот устройства может быть достигнуто посредством приближения стенок пролетного канала к электронному лучу за счет выполнения электронного зазора в паре резонаторов (входном и выходном) совместно, обеспечивая при изготовлении непрерывность поворота зазора на всей длине пространства взаимодействия согласно с поворотом «ленты»

электронного луча в зазоре (патент на изобретение № 2731297 от 28.01.2020).

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались на конференциях разного уровня:

– Всероссийских конференциях «СВЧ-электроника», г. Фрязино Московской обл., АО «НПП «Исток» им. Шокина» – в 2003 г., 2013 г.; «Расплетинские чтения», г. Москва, ПАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина» – в 2017 г.

– Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь – в 2001 г. (2 доклада), 2003 г., 2005 г., 2014 г. (2 доклада), 2015 г., 2020 г.

– IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC – в 2001 г., 2006 г., 2009 г., 2011 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 228 страниц, включая список литературы из 136 наименований, 59 рисунков и 4 приложения.

Основное содержание работы

Во введении рассмотрено в историческом аспекте создание и исследование малошумящих усилителей на быстрой циклотронной волне (БЦВ) электронного луча: электронно-лучевых параметрических усилителей (ЭПУ) и электростатических усилителей (ЭСУ). Проведен краткий обзор основных научных работ, выполненных рядом авторов (начиная с 1947 г.), направленных на изучение процессов возбуждения и взаимодействия поперечных волн, распространяющихся в электронном луче, помещенном в однородное или адиабатически изменяющееся продольное магнитное поле. Показано, что ЦЗУ успешно продолжают и развивают данное направление вакуумной СВЧ электроники, начало которому в НПО «Исток» было положено С.П. Кантюком и Ю.А. Будзинским.

В главе 1 представлен обзор СВЧ защитных устройств (ЗУ) приемников РЛС.

В § 1.1 кратко рассмотрены назначение и основные задачи ЗУ, существующие типы ЗУ и их определяющие параметры.

В настоящей работе не рассматриваются ЗУ для случая РЛС с использованием активных фазированных антенных решеток.

§ 1.2 Газоразрядные ЗУ – на сегодняшний день несомненные лидеры по уровню предельной входной СВЧ мощности. Допустимая импульсная мощность может достигать нескольких МВт. К недостаткам газоразрядных ЗУ следует отнести значительный пик просачивающейся мощности, который может приводить к повреждению чувствительных последующих каскадов, а также значительное время восстановления, которое, как правило, не менее 1 мкс. Типичное время восстановления газовых разрядников составляет от 5 мкс до 20 мкс и более.

§ 1.3 Полупроводниковые ЗУ – наиболее распространены в настоящее время из-за малых габаритов и удобства применения, можно разделить на две группы: автономные и управляемые рpn-диодные ЗУ.

Управляемые рpn-диодные ЗУ могут эффективно защищать приемник от мощности собственного передатчика и должны быть синхронизированы с его импульсом по времени управляющего сигнала. Однако, защита приемника от импульсов посторонней СВЧ мощности не будет реализована.

Современные автономные полупроводниковые ЗУ см-диапазона длин волн могут обеспечивать работу с предельной входной импульсной мощностью до 10 кВт при длительности импульса до 30 мкс и скважностью от 10 до 1000, при этом с увеличением рабочей частоты и импульсной мощности длительность импульса сокращается. Мощность просачивающегося пика на выходе ЗУ – 100...500 мВт, время восстановления 1...5 мкс.

§ 1.4 Ферритовые ЗУ – устройства ограничительного типа. Предельная мощность в значительной степени определяется типом и эффективностью охлаждения. Чаще используются как устройства средней мощности – до нескольких киловатт импульсной и нескольких сотен ватт средней мощности. Характерен значительный уровень просачивающейся на выход мощности, как плоской части импульса (не менее нескольких Вт), так и пика на переднем фронте входного импульса, достаточно малое время восстановления – 50...100 нс.

§ 1.5 Электронно-разрядные ЗУ (мультипакторы) – работа основана на использовании вторично-электронного резонанса в вакууме. Являются устройствами предварительной защиты, характерно сверхмалое время восстановления – от 10 до 50 нс. Фирмы-изготовители – Hughes Aircraft Co. и CPI International.

§ 1.6 Гибридные ЗУ – оптимизированные многокаскадные варианты защитных устройств, описанных выше. В см-диапазоне длин волн работают с предельной мощностью до нескольких киловатт импульсной мощности, с временем восстановления приблизительно 5...10 мкс, с ослаблением сигнала в режиме приема ≈ 1 дБ.

В заключении (§ 1.7) отмечается, что в современной радиолокации все чаще используются длинные и квазинепрерывные импульсы со сложным фазовым и частотным наполнением с уровнями выходной мощности передатчиков не более нескольких десятков киловатт. При этом исключительно важными становятся такие параметры ЗУ, как сверхмалое время восстановления, высокий уровень границы линейности, отсутствие пиков просачивающейся мощности. По перечисленным параметрам от рассмотренных выше ЗУ различных типов выгодно отличаются циклотронные защитные устройства (ЦЗУ).

В главе 2 изложены основные принципы работы циклотронного защитного устройства (ЦЗУ).

В § 2.1 поясняется, что ЦЗУ – это вакуумный электронно-лучевой СВЧ прибор, в котором электронный луч движется в продольном однородном магнитном поле. Сигнальное высокочастотное электрическое поле в резонаторах связи направлено перпендикулярно к направлению движения электронного луча.

Следует выделить три режима работы ЦЗУ в зависимости от уровня входной СВЧ мощности. **Режим пропускания** сигнала – электронный луч проходит от катода до коллектора, при этом входная СВЧ мощность (сигнал) переносится лучом из входного резонатора в выходной резонатор, не нарушая прохождения луча (см. рис. 1). **Режим защиты** – электронный луч разрушен под действием входной СВЧ мощности, мощность с входа на выход ЦЗУ просачивается за счет

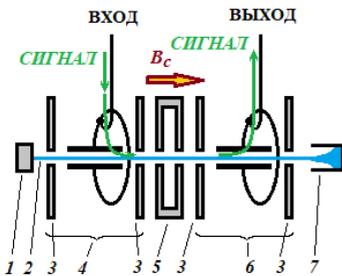


Рис. 1. Функциональная схема ЦЗУ в режиме пропускания. Цифрами обозн.: 1 – электронная пушка, 2 – электронный луч, 3 – диски, закрывающие резонаторы со стороны пушки и со стороны коллектора, 4 – входной резонатор, 5 – разделительная секция, 6 – выходной резонатор, 7 – коллектор. B_c – вектор магнитной индукции, обеспеч. циклотрон. резонанс.

излучения из входного резонатора в выходной (с ослаблением более 60 дБ) через отверстие для прохождения электронного луча в смежных

дисках, закрывающих резонаторы, и в разделительной секции. До 90% падающей СВЧ мощности отражается от входного резонатора ЦЗУ, не нагруженного электронным лучом. **Переходный режим** – имеет место при переходе из режима пропускания в режим защиты ЦЗУ. При достижении и некотором превышении входной СВЧ мощностью порогового уровня краевые электроны луча начинают оседать на стенках электронного зазора, линейность прохождения сигнала в ЦЗУ нарушается.

ЦЗУ – это автономное защитное устройство, которое переходит в режим защиты и в режим пропускания без внешнего сигнала управления, в зависимости от уровня входной СВЧ мощности в рабочем диапазоне частот. Сигнал с входа на выход ЦЗУ может поступать лишь посредством электронного луча в пределах его энергетической емкости. По этой причине в ЦЗУ, в отличие от газоразрядных и полупроводниковых ЗУ, отсутствует пик просачивающейся мощности. Энергетическая емкость луча определяет границу линейности ЦЗУ и пиковую мощность на выходе при переходе из режима пропускания в режим защиты.

В § 2.2 рассматриваются 4 типа поперечных волн, которые могут существовать в луче, дрейфующем в продольном однородном магнитном поле: Быстрая циклотронная волна (БЦВ) и Медленная циклотронная волна (МЦВ) – волны поперечных скоростей электронов, Быстрая синхронная волна (БСВ) и Медленная синхронная волна (МСВ) – волны поперечных смещений электронов. Основываясь на модели нитевидного электронного луча и круговой поляризации колебаний получено выражение для суммы указанных волн:

$$r(z, t) = R_{1+} e^{j(\omega t - (\beta_e - \beta_c)z)} + R_{2+} e^{j(\omega t - \beta_e z)} + R_{1-} e^{-j(\omega t - (\beta_e + \beta_c)z)} + R_{2-} e^{-j(\omega t - \beta_e z)}, \quad (1)$$

где $r = x + jy$ – комплексная поперечная координата, R_{1+} и R_{1-} – амплитуды БЦВ и МЦВ, R_{2+} и R_{2-} – амплитуды МСВ и БСВ, ω – круговая частота сигнала, z – продольная координата, t – время, $\beta_e = \omega/V_0$ и $\beta_c = \omega_c/V_0$ – фазовые постоянные распространения на частоте сигнала ω и циклотронной частоте ω_c соответственно, V_0 – скорость дрейфа луча с потенциалом U_0 .

В более ранних теоретических работах по ЭПУ показано, что модель нитевидного электронного луча правильно отражает особенности взаимодействия резонатора с равномерно заряженным электронным лучом конечного поперечного сечения, при этом

нитевидный луч совпадает с линией, вдоль которой расположены центры масс поперечных сечений реального электронного луча.

Картина поперечных волн в нитевидном электронном луче поясняется рис. 2.

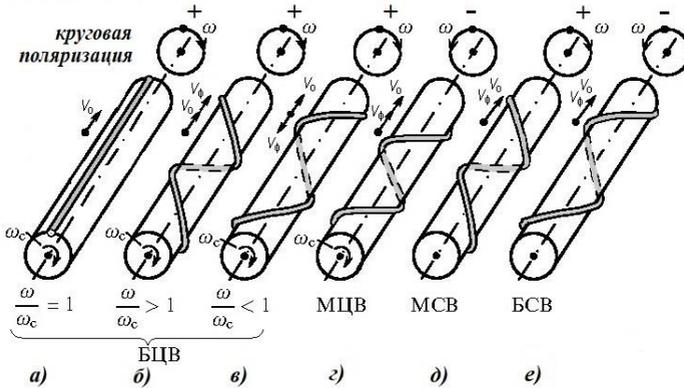


Рис. 2. Пространственная конфигурация нитевидного электронного луча, возбужденного на разных типах поперечных волн (внутренний цилиндр, на котором «закреплен» электронный луч, изображен для наглядности).

Дисперсионные характеристики поперечных волн:

$$V_{\phi 1\pm} = V_0 \frac{1}{1 \mp \frac{\omega_c}{\omega}}, \quad V_{\phi 2\pm} = V_0, \quad (V_{\phi 1+} = \infty \text{ при } \omega = \omega_c) \quad (2)$$

где $V_{\phi 1\pm}$ - фазовые скорости БЦВ и МЦВ, $V_{\phi 2\pm}$ - фазовые скорости МСВ и БСВ соответственно.

Фаза СВЧ поля одинакова на всей длине ламелей резонаторов ЦЗУ (резонаторов Куччия) (см. рис. 3), т.е. можно говорить о бесконечно высокой фазовой скорости распространения волны вдоль зазора в ламелях резонатора. Это обуславливает селективное взаимодействие с БЦВ на частотах вблизи циклотронного резонанса.

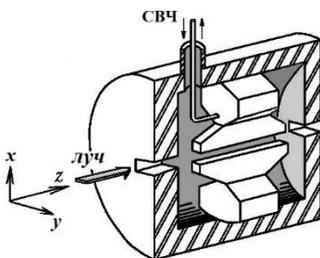


Рис. 3. Изображение в разрезе и фото резонатора Куччия без верхней крышки.

В § 2.3 аналитически рассмотрены частотные параметры, ослабление сигнала и коэффициент шума ЦЗУ в режиме пропускания.

В п. 2.3.1 показано, что определяющим критерием рабочей полосы частот является степень выполнения условий комплексно-сопряженного согласования проводимостей внешней нагрузки ЦЗУ, резонатора связи с электронным лучом и электронного луча в зазоре резонатора. Приведены выражения для активной и реактивной проводимостей электронного луча. Проанализировано влияние соотношения проводимостей на полосу частот, см. рис. 4.

В п. 2.3.2 отмечается, что частотная характеристика ЦЗУ в широкой полосе частот носит резонансный характер, на который накладываются особенности взаимодействия БЦВ с резонатором Куччия. При отстройке от резонанса по углу пролета на величину $\theta = 2\pi \cdot n$, где $n = \pm 1, \pm 2, \dots$, активная электронная проводимость

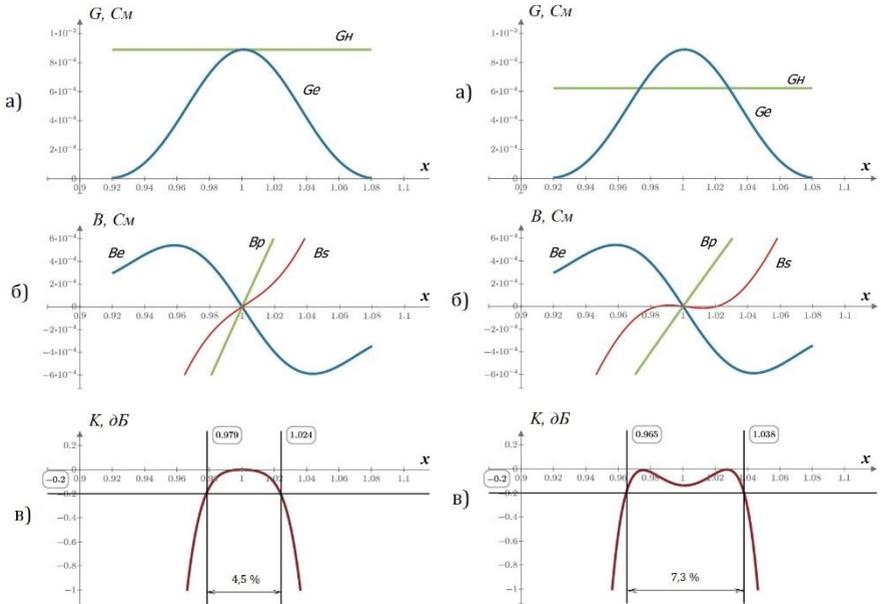


Рис. 4. Частотные зависимости ($x = \omega/\omega_c$) проводимостей и коэффициента передачи: а) активные проводимости электронного луча (G_e) и нагрузки (G_n); б) реактивные проводимости электронного луча (B_e), резонатора (B_p) и их сумма (B_s); в) коэффициент передачи (K) внешняя нагрузка – электронный луч. На кривых справа: резонатор «перегружен» внешней нагрузкой $G_n = 0,7 \cdot G_0$, увеличено характеристическое сопротивление ρ резонатора. G_0 – активная проводимость луча на циклотронной частоте.

обращается в ноль, а коэффициент передачи стремится к бесконечно большому затуханию (соответствующая экспериментальная зависимость показана на рис. 14). Физически это объясняется тем, что линия, вдоль которой расположены центры масс поперечных сечений электронного луча, приобретает форму спирали (см. рис. 2-б, 2-в), которая на длине резонатора имеет ровно целое количество витков. Циклотронное вращение указанной «спирали» суммарно не наводит в резонаторе ВЧ ток, т.к. для каждого парциального тока, наводимого каким-либо участком луча, имеется противофазный аналогичный по величине ток, наводимый аналогичным участком луча, вращающимся в противофазе.

В п. 2.3.3 указывается, что ЦЗУ является пассивным устройством, при этом коэффициент шума ЦЗУ превышает ослабление сигнала в нем. Причиной этого является использование для передачи сигнала электронного луча, который испускается нагретым катодом и содержит дополнительную шумовую энергию, обусловленную температурой катода $\approx 900^\circ\text{K}$.

Причины ослабления сигнала и источники шума в ЦЗУ: 1) ослабление сигнала вследствие активных потерь и отражений во входном и выходном СВЧ трактах – резонаторах, линиях связи и вакуумных окнах; 2) остаточная шумовая энергия в сигнальной БЦВ при неполном согласовании электронной нагрузки входного резонатора с его внешней нагрузкой; 3) разброс скоростей электронов луча при передаче сигнала БЦВ – показано, что данным механизмом можно пренебречь; 4) влияние поля пространственного заряда луча – при рассеянии электронов на частицах остаточных газов возможно появление шумовых «вакуумных» пиков на частотах ω_c'' , смещенных от циклотронной частоты вниз в зависимости от уровня плазменной частоты ω_p в луче; 5) к аналогичным шумовым пикам рассеянных электронов приводит оседание луча на стенках зазора резонаторов при неполной юстировке.

Оценки коэффициента шума ($K_{ш}$) дают следующие значения: $K_{ш} = 0,4$ дБ при КСВН входа и выхода $\sigma = 1,0$; $K_{ш} = 0,76$ дБ при $\sigma = 1,3$; $K_{ш} = 1,2$ дБ при $\sigma = 1,5$.

В п. 2.3.4 выполнены оценки устойчивости электронного луча в ЦЗУ от уровня запаса величины рабочего магнитного поля (обеспечивающего циклотронный резонанс) относительно Бриллюэновского. Показано, что для частоты 2 ГГц рабочее магнитное поле в 1,8 раза превышает Бриллюэновское магнитное поле для типичных параметров электронного луча. С увеличением рабочей

частоты ЦЗУ запас уровня магнитного поля по отношению к Бриллюэновскому пропорционально возрастает, для рабочих частот приблизительно от 4 ГГц и выше электронный луч жестко удерживается магнитным полем. В диапазоне частот от 2 ГГц до 4 ГГц следует принимать дополнительные меры по снижению плотности пространственного заряда электронного луча.

В § 2.4 изложены основные требования и особенности ЦЗУ при работе в режиме защиты: тепловая устойчивость и электрическая прочность входного СВЧ тракта (в режиме стоячей волны); отсутствие пика просачивающейся на выход ЦЗУ мощности по переднему фронту мощного входного СВЧ импульса; обеспечение необходимого уровня ослабления мощности плоской части входного импульса, просачивающейся на выход; предельно малое время восстановления параметров режима пропускания.

В главе 3 рассматриваются вопросы разработки и исследования ЦЗУ. На рис. 5 показан типичный вакуумный блок в разрезе (§ 3.1).

В § 3.2 исследовано влияние факторов, приводящих к увеличению коэффициента шума.

Влияние рассеянных электронов (п. 3.2.1) на коэффициент шума оценивается по двум факторам:

1) Диаметр циклотронного вращения электронов зависит от энергии дрейфа луча и циклотронной частоты. Если диаметр вращения

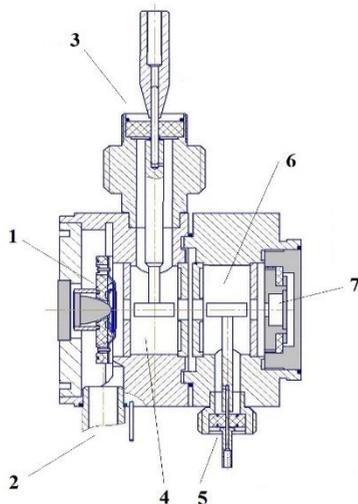


Рис. 5. Разрез вакуумного блока ЦЗУ. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – электронная пушка, 2 – штенгель для откачки, 3 – коаксиальный участок входной СВЧ линии, 4 – входной объемный резонатор, 5 – выходная коаксиальная СВЧ линия, 6 – выходной объемный резонатор, 7 – коллектор. Сплошным серым цветом выделены элементы конструкции из ферромагнитного материала.

Разрез выполнен по плоскости электронного зазора в резонаторах, на рисунках показана ширина ламелей входного и выходного резонаторов, соответствующая ширине ленточного электронного луча.

электронов, упруго рассеянных под углом, близким к 90° по отношению к продольной оси, равен или превышает величину зазора в резонаторе, то шумовой пик не возникает вследствие оседания рассеянных электронов на стенках. Если диаметр вращения заметно меньше величины зазора, то рассеянные электроны могут накапливаться в зазоре резонатора и наводить шумовые ВЧ токи, которые наблюдаются в виде шумовых пиков на кривой зависимости коэффициента шума от частоты. Электроны, рассеянные под малыми углами по отношению к продольной оси луча, быстро уходят из зазора резонатора и заметно не ухудшают коэффициент шума.

2) Частота колебаний рассеянных электронов ω_c'' несколько ниже циклотронной частоты вследствие влияния пространственного заряда луча (см. пример на рис. 6). В ЦЗУ низкочастотного диапазона при высокой плотности пространственного заряда луча частота шумового «вакуумного» пика по этой причине выходит за рабочую полосу частот. Подобные ЦЗУ менее критичны к уровню вакуума.

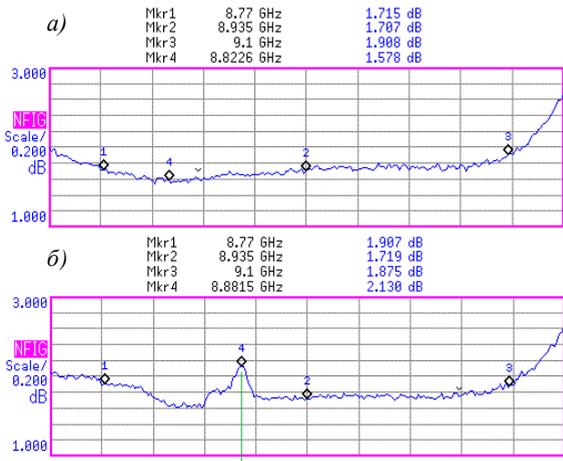


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента шума ЦЗУ+МШУ (диапазон частот 9 ГГц, $K_{ш, МШУ} = 1,0\text{дБ}$): а) без шумового пика рассеянных электронов; б) шумовой «вакуумный» пик (маркер 4) при том же режиме электронного луча. Циклотронная частота – маркер 2.

«Вакуумный» пик получен путем нагревания одного из элементов ЦЗУ газовой горелкой.

Аналогичным образом влияют на коэффициент шума вторичные электроны из области коллектора (п. 3.2.2): упруго и неупруго отраженные электроны и «истинно» вторичные электроны, выбитые из поверхности коллектора первичными электронами. Вторичные электроны, попадающие в зазор выходного резонатора из области коллектора, совершают шумовые колебания с частотами преимущественно вблизи циклотронной частоты и являются источником собственных шумов ЦЗУ, их количество зависит от

величины потенциального барьера коллектор-корпус (потенциал $U_{\text{кол}}$ на рис. 7).

В некоторых типах ЦЗКУ эффект увеличения коэффициента шума ЦЗУ при снижении напряжения коллектора используется в качестве специального режима «увеличенной мощности шумов» для выполнения калибровки приемного тракта аппаратуры.

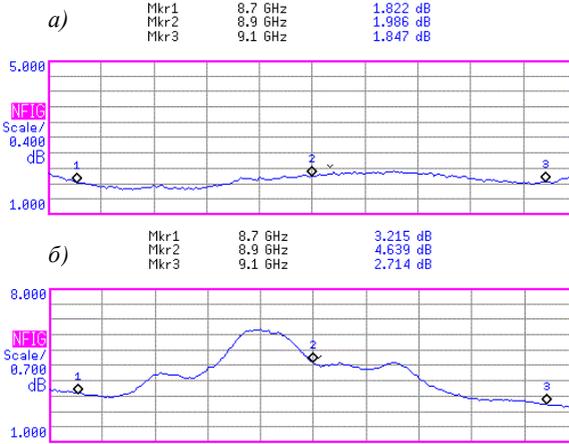


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента шума ЦЗУ+МШУ (диапазон частот 9 ГГц, $K_{\text{ш.МШУ}} = 1,0$ дБ) при различных напряжениях на коллекторе:

а) $U_{\text{кол}} = 200$ В – номинальный режим;

б) $U_{\text{кол}} = 30$ В.

Напряжение $U_{\text{кол}}$ указано относительно катода, при этом напряжение катод-корпус $U_{\text{кат-корп}} = 12$ В.

В п. 3.2.3 рассмотрен сдвиг частоты нагруженного резонатора. Показано, что заметное смещение вниз частоты сильно нагруженного резонатора по отношению к собственной частоте ненагруженного резонатора может осложнять выполнение условий комплексно-сопряженного согласования проводимостей и ухудшать шумовые характеристики ЦЗУ.

В § 3.3 анализируется амплитудная линейность ЦЗУ и переход в режим защиты. Специфика переходного режима определяется положением луча в электронном зазоре входного и выходного резонаторов (см. рис. 8) и другими параметрами.

Для аналитической оценки границы линейности и параметров перехода ЦЗУ в режим защиты получено следующее выражение для мощности циклотронных колебаний луча P :

$$P = \frac{I_0}{2(e/m)} \omega_c^2 R^2, \quad (3)$$

где I_0 – ток луча, e и m – заряд и масса электрона, ω_c – круговая циклотронная частота, R – конечный радиус циклотронного вращения.

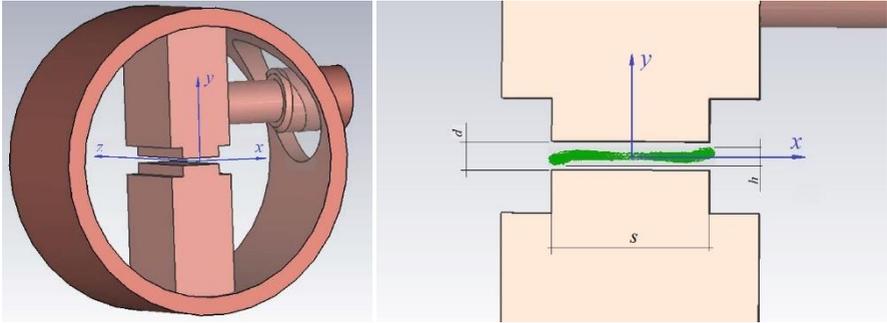


Рис. 8. Резонатор ЦЗУ без закрывающих дисков и поперечное сечение ленточного электронного луча (показан зеленым цветом) в зазоре резонатора. Ось z – направление дрейфа луча, d – величина зазора, s – ширина ламели, h – толщина луча с учетом его деформации.

При типичных характеристиках стандартного ЦЗУ диапазона частот $f_c = 9$ ГГц: $I_0 = 200$ мкА, $d = 130$ мкм, $h = 100$ мкм (см. рис. 8) могут быть получены характерные граничные мощности: $P_{гр1} = -4$ дБмВт – мощность, при которой начинается оседание краевых электронов луча ($R = (d - h) / 2$) и $P_{гр2} = 9$ дБмВт – мощность полного оседания луча на стенках зазора (переход ЦЗУ в режим защиты, $R = 0,5 \cdot d$).

Кривые экспериментальных амплитудных характеристик, снятых для ЦЗУ диапазонов частот 3 ГГц и 9 ГГц, приведены на рис. 9 и рис. 10. ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц (рис. 9) – расчетные оценочные данные ($P_{гр1}$, $P_{гр2}$) хорошо согласуются с результатами эксперимента. Компрессия коэффициента передачи на 1 дБ происходит при входной мощности $-4 \dots -5$ дБмВт, что соответствует уменьшению тока луча

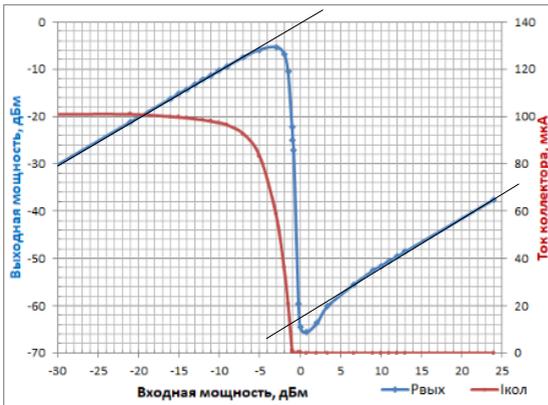


Рис. 9. Амплитудная характеристика и зависимость тока коллектора от входной мощности ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц. $I_0 = 100$ мкА, $d = 200$ мкм, $h = 150$ мкм, $P_{гр1} \approx -12$ дБмВт (расчет), $P_{-1дБ} = -4 \dots -5$ дБмВт, $P_{гр2} \approx 0$ дБмВт (расчет). Ослабление в режиме защиты $L_{защ} = 62$ дБ.

вследствие оседания под воздействием данной входной мощности в 1,26 раза (соответствует 1 дБ).

ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц (рис. 10) – режим с током луча 212 мкА: верхняя граница линейности по компрессии коэффициента передачи на 1 дБ составляет ≈ 4 дБмВт, при этом прохождение электронного луча на коллектор соответственно снижается приблизительно в 1,26 раза. Амплитудная характеристика при уменьшении тока луча в 2,1 раза (100 мкА, пунктирные кривые) практически в неизменном виде перемещается в область меньших входных мощностей на соответствующую величину $\approx 3,2$ дБ, т.е. в соответствии с уменьшением тока луча.

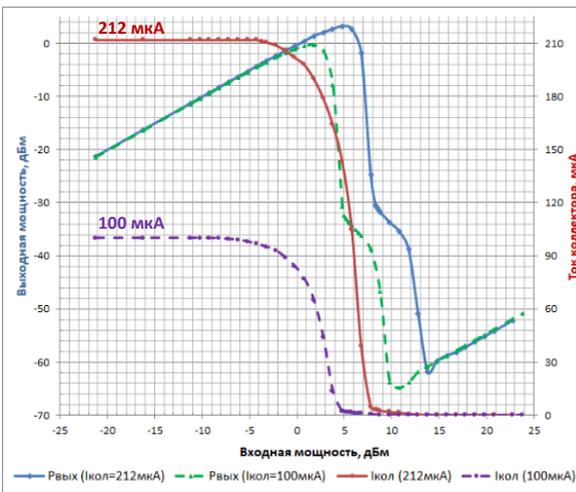


Рис. 10. Амплитудные характеристики и зависимости тока коллектора от входной мощности ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц ($d = 130$ мкм, $h = 100$ мкм) в двух режимах:

1) $I_0 = 212$ мкА (сплошные линии)

$P_{гр1} \approx -4$ дБмВт (расчет),

$P_{-1дБ} = 3 \dots 5$ дБмВт;

2) $I_0 = 100$ мкА (пунктир. линии)

Ослабление в режиме защиты $L_{зщ} = 74$ дБ.

Обе амплитудные характеристики образца при токе луча 212 мкА и 100 мкА имеют характерный изгиб в средней области переходного участка. Данный эффект объясняется тем, что ленточный электронный луч для данного типа ЦЗУ по своей ширине приблизительно равен ширине ламели s . В данном конкретном образце луч расположен не вполне симметрично относительно ширины ламелей s входного резонатора (см. рис. 8), – один край луча несколько выходит из области рабочего зазора в направлении параллельном оси x . Таким образом, для разрушения данного элемента луча требуется повышенная входная мощность, амплитудная характеристика приобретает дополнительный изгиб в сторону повышения входной мощности на участке перехода из режима пропускания в режим защиты ЦЗУ.

Представленные экспериментальные кривые подтверждают, что передача сигнала ЦЗУ в режиме пропускания является линейным процессом (работа ЦЗУ не связана с образованием сгустков и разрежений плотности электронного луча, подобно ЛБВ и клистронам, и соответствующими нелинейными эффектами). Граница амплитудной линейности определяется началом оседания электронов луча на стенках пролетного канала, зависит от рабочей частоты, тока электронного луча, геометрических размеров электронного зазора и поперечного сечения электронного луча в зазоре.

В § 3.4 исследуются временные параметры включения и выключения режима защиты ЦЗУ. Включение и выключение режима защиты происходит автономным образом.

В связи с тем, что пиковая мощность на выходе устройства при переходе в режим защиты определяется энергетической емкостью электронного луча, в ЦЗУ отсутствует пик просачивающейся на выход мощности. По этой причине такой параметр, как время включения режима защиты (время срабатывания) не характерен для ЦЗУ.

Время восстановления параметров ЦЗУ после окончания мощного входного СВЧ импульса имеет сверхмалую продолжительность, что является чрезвычайно важной характеристикой ЦЗУ и выделяет его среди других типов защитных устройств. Время восстановления ЦЗУ определяется временем затухания колебаний ВЧ энергии, поступившей во входной резонатор к моменту окончания импульса входной СВЧ мощности, и временем пролета электронного луча между центрами входного и выходного резонаторов после восстановления прохождения луча. Затухание колебаний во входном резонаторе происходит достаточно быстро в силу его низкой добротности.

При рассмотрении процессов восстановления прохождения сигнала следует полагать длительность заднего фронта (среза) мощного входного импульса пренебрежимо малой, близкой к нулю. Целесообразно выделить 4 этапа данного процесса:

- 1) Снижение накопленной во входном резонаторе СВЧ энергии от пикового уровня до минимального уровня, при котором в зазоре резонатора еще отсутствуют электроны луча. Резонатор не нагружен электронным лучом. Продолжается режим защиты.
- 2) Дальнейшее снижение энергии во входном резонаторе до уровня верхней границы линейности. Нагрузка резонатора электронным лучом возрастает от нулевой до практически максимальной.

3) Дальнейшее снижение энергии во входном резонаторе до уровня максимальной чувствительности ЦЗУ (до уровня минимальной мощности входного сигнала, уверенно различимого над собственными шумами ЦЗУ, т.е. приблизительно на 90 дБ). Резонатор нагружен электронным лучом. Имеет место режим пропускания сигнала.

4) Задержка передачи сигнала из входного резонатора в выходной, связанная с временем пролета электронов луча между резонаторами.

СВЧ мощность во входном резонаторе к моменту окончания входного импульса составляет приблизительно 10% от мощности импульса в связи с тем, что резонатор не нагружен электронным лучом и его «холодный» КСВН $\sigma \approx 30$. Для оценки времени t снижения мощности в резонаторе от уровня P_1 до уровня P_2 следует использовать полученное выражение:

$$t = \frac{Q}{2\pi f} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (4)$$

где Q – добротность резонатора, f – частота колебаний.

Исходя из типичных добротностей резонаторов получены следующие оценочные времена продолжительности этапов 1...4 при входной импульсной мощности $P_{\text{вх.имп}}$:

f , ГГц	$P_{\text{вх.имп}}$, кВт	Этап 1, нс	Этап 2, нс	Этап 3, нс	Этап 4, нс
10	1	3,8	0,6	2,6	2...5
	10	4,7			
3	1	15,6	2,0	8,8	
	10	18,6			

Учитывая, что прохождение сигнала восстанавливается за время этапов 1, 2 и 4, время восстановления ЦЗУ $t_{\text{в}}$ составляет:

для частоты $f = 10$ ГГц - $t_{\text{в}} \approx 10$ нс;

для частоты $f = 3$ ГГц - $t_{\text{в}} \approx 22...26$ нс.

За дополнительное время от 3 до 10 нс (в зависимости от диапазона рабочих частот, продолжительность этапа 3) в ЦЗУ восстанавливается максимальная чувствительность, соответствующая коэффициенту шума 1...1,5 дБ.

Чтобы реализовать минимально возможное время восстановления ЦЗУ и максимально быстро начать работать с принимаемым полезным сигналом, следует прежде всего правильно распорядиться СВЧ мощностью высокого уровня завершившегося импульса, которая отразилась от входа ЦЗУ в режиме защиты. Данная отраженная мощность должна быть направлена в нагрузку циркулятора

или поглощена вентиляем и не должна многократно переотражаться во входном тракте перед ЦЗУ. При этом циркулятор или клапан должны иметь минимальный КСВН со стороны ЦЗУ и должны быть расположены по возможности ближе к защитному устройству. Данный тезис подтверждается экспериментальными осциллограммами на рис. 11.

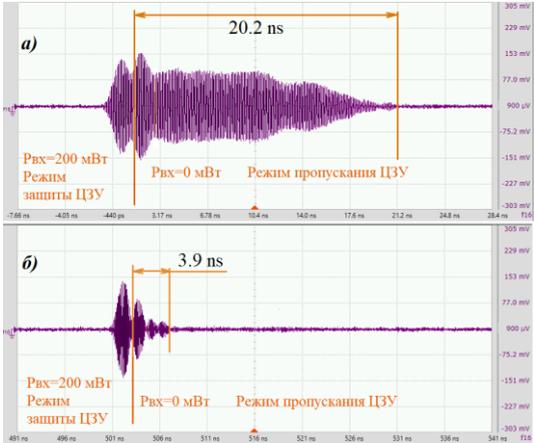


Рис. 11. Осциллограммы СВЧ мощности на выходе ЦЗУ при переходе в режим пропускания ($f = 10 \text{ ГГц}$, $P_{вх.имп} = 200 \text{ мВт}$, длительность заднего фронта импульса 0,68 нс):

а) развязывающее устройство между генератором и ЦЗУ отсутствует, длина соединительного кабеля 0,9 м;
 б) то же, дополнительно к входу ЦЗУ подсоединен клапан.

На рис. 12 приведена осциллограмма импульса на входе ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц и соответствующая осциллограмма на выходе ЦЗУ. Входной импульс мощностью 200 мВт и длительностью 500 нс имеет длительность заднего фронта 2,4 нс.

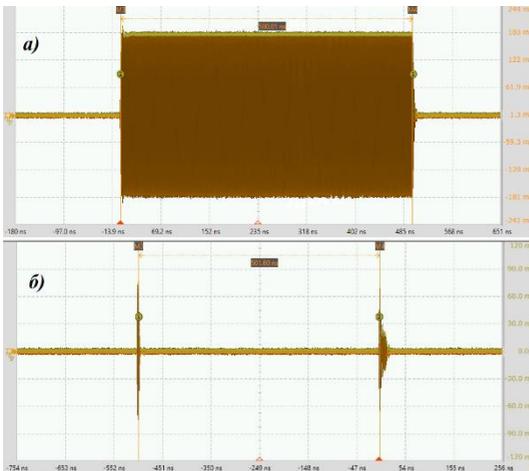


Рис. 12. Осциллограммы СВЧ мощности (в разном масштабе по времени) на входе и выходе ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц: а) входной импульс мощностью 200 мВт; б) соответствующий импульс на выходе ЦЗУ: метка «1» - прохождение переднего фронта, метка «2» - прохождение заднего фронта плюс время восстановления.

Воздействие данного импульса переводит ЦЗУ в режим защиты. При этом на выходе ЦЗУ имеют место короткие пики мощности, соответствующие начальной части переднего фронта импульса (до уровня мощности 1...3 мВт) – метка «1» на рис. 12-б, а также окончанию заднего фронта импульса (при спадении мощности ниже уровня 1...3 мВт) – метка «2» на рис. 12-б. Пик на окончании заднего фронта импульса продлевается за счет процессов, связанных с восстановлением прохождения сигнала в ЦЗУ, до приблизительно 20 нс при том, что длительность заднего фронта импульса составляет 2,4 нс.

На рис. 13 приведена двухканальная осциллограмма окончания импульса мощностью 70 Вт на входе и выходе ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц. Свообразная форма окончания входного импульса мощности продолжительностью ≈ 30 нс связана очевидно с тем, что использованный усилитель мощности имеет в своем составе минимум два каскада, при этом последний каскад работает в режиме насыщения или ограничения мощности.

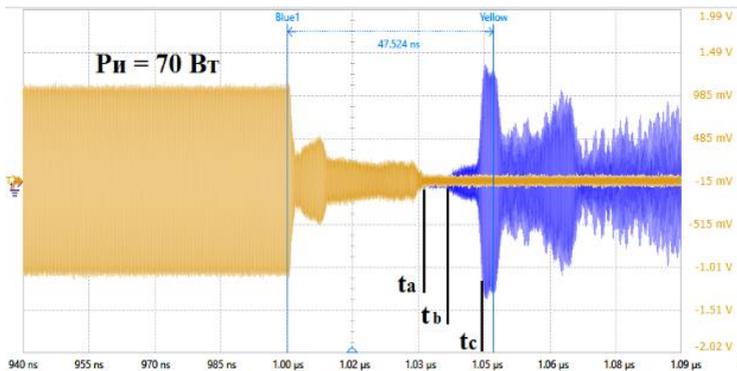


Рис. 13. Двухканальная осциллограмма окончания импульса СВЧ мощности с уровнем 70 Вт на входе ЦЗУ (желтый цвет) и выходе ЦЗУ (синий цвет) диапазона частот 10 ГГц. Моменты времени: t_a – окончание импульса мощности на входе ЦЗУ; t_b – момент появления электронного луча в выходном резонаторе; t_c – восстановление прохождения сигнала в ЦЗУ.

Продолжительность интервала $t_a \dots t_b$ равна 5,3 нс; интервала $t_b \dots t_c$ – 7,8 нс (во входной резонатор продолжает поступать мощность на окончании заднего фронта входного импульса); момент времени t_c – восстанавливается полное прохождение электронного луча. Правее точки t_c – СВЧ мощность на выходе ЦЗУ (изображение синего цвета, мощность менее 1 мВт), которая представляет собой прошедшую через

ЦЗУ входную мощность, присутствующую в паузах между мощными входными импульсами. Данная мощность имеет шумовой характер.

Реальные импульсы мощности с уровнем в единицы и десятки киловатт не имеют столь коротких времен спада мощности. При мощностях в единицы мВт (до 10...20 мВт), когда в ЦЗУ начинаются процессы восстановления прохождения луча, скорость спада мощности, как правило, существенно снижается. Это приводит к частичному перекрытию и объединению этапов восстановления прохождения сигнала через ЦЗУ. Наступление момента, когда приемник способен принимать полезный сигнал, принятый антенной, часто в большей степени определяется продолжительностью заднего фронта мощного импульса, а не временем восстановления ЦЗУ.

В § 3.5 представлены данные по фазовой линейности ЦЗУ в рабочей полосе частот. Электрическая длина ЦЗУ включает входной волноводно-коаксиальный (коаксиальный) переход, коаксиальный ввод во входной резонатор, включающий керамическую вакуумно-плотную шайбу, входной резонатор, участок передачи сигнала электронным лучом, выходной резонатор, коаксиальный вывод из выходного резонатора с керамической вакуумно-плотной шайбой, а также полужесткий коаксиальный кабель, соединяющий выход ЦЗУ с входом малошумящего транзисторного усилителя (МШУ). Экспериментально измеренное групповое время запаздывания в ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц в полосе рабочих частот изменяется от 4,8 нс до 5,4 нс.

В § 3.6 рассматриваются основные параметры электромагнитной совместимости ЦЗУ. Подавление побочных каналов приема за счет использования ЦЗУ обусловлено частотной избирательностью устройства. Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц в широкой полосе частот приведена на рис. 14.

Продукты интермодуляции двух сигналов в рабочей полосе частот ЦЗУ связаны с нелинейностью, обусловленной началом оседания луча на стенках пролетного канала и появляются при оседании менее 0,1% от тока луча. Динамический диапазон по интермодуляции превышает 75 дБ (диапазон частот 9 ГГц).

Блокирование сигнала помехой в рабочей полосе частот также связано с оседанием луча вследствие воздействия помехи. При мощности помехи – 6,5 дБмВт прохождение луча ухудшается

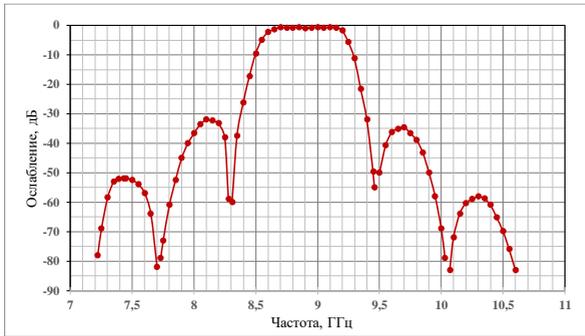


Рис. 14. Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц в широкой полосе частот.

приблизительно на 0,4%, в этом случае амплитуда сигнала с уровнем – 110 дБмВт понижается на 0,5 дБ (диапазон частот 9 ГГц).

В § 3.7 приведены данные по амплитудным и фазовым шумам ЦЗУ. Показано, что амплитудные и фазовые шумы ЦЗУ чувствительны к пульсациям питающего напряжения, то есть, к скорости дрейфа луча. В большей степени проявляются при отстройке от циклотронной частоты, т.к. приводят к размытию циклотронной спирали центра масс поперечных сечений электронного луча.

В главе 4 рассмотрены основные вопросы конструирования ЦЗУ.

В § 4.1 отмечено, что использование в магнитной системе ЦЗУ составных магнитов на каждом из полюсов позволяет, сдвигая или раздвигая магниты в определенных пределах, корректировать уровень и продольное распределение магнитного поля (см. рис. 15).

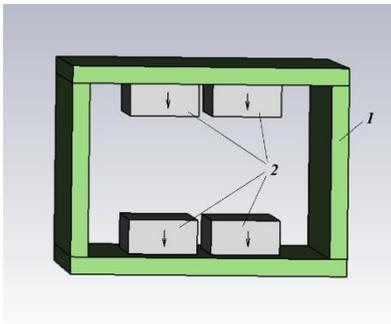


Рис. 15. Магнитная система ЦЗУ с составными магнитами на каждом полюсе. Цифрами обозначены: 1 – магнитопровод, 2 – магниты. Стрелками обозначено направление вектора намагниченности магнитов.

В § 4.2 показано, что стойкость ЦЗУ к входной СВЧ мощности высокого уровня определяется двумя факторами: электрической прочностью входного тракта, а также тепловой устойчивостью входного тракта и входного резонатора, т.к. в них рассеивается до 10% падающей СВЧ мощности. В ЦЗУ с входным волноводом для

повышения электрической прочности целесообразно соединять зонд, продолжающий центральный проводник коаксиала, с противоположной стенкой волновода (см. рис. 16). Тепловая устойчивость повышается введением жидкостного охлаждения.

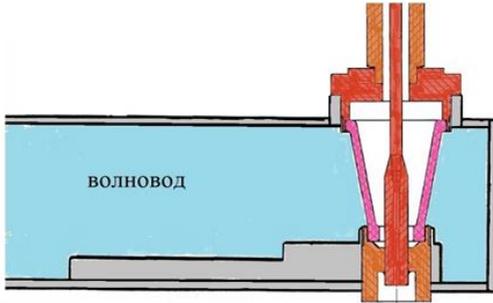


Рис. 16. Вариант соединения вакуумного блока ЦЗУ с входным волноводом для работы с увеличенным уровнем предельной входной СВЧ мощности. Конус малинового цвета выполнен из керамики.

В § 4.3 отмечается, что один из основных проблемных вопросов конструкции ЦЗУ – это обеспечение пропускания электронного луча через зазор в резонаторах без оседания на стенках зазора. Поперечное сечение ленточного электронного луча ЦЗУ, движущегося в однородном продольном магнитном поле, претерпевает существенную деформацию на участке от электронной пушки до коллектора – поперечное сечение луча видоизменяется, особенно на краях «ленты», приобретает *s*-образную форму. Помимо этого, плоскость ленточного луча, как целого, поворачивается на несколько градусов.

Помимо традиционного метода – поворота выходного резонатора относительно входного и, соответственно, зазора в резонаторах на соответствующий угол, предложено выполнять прорезку электронного зазора в паре резонаторов (входном и выходном) совместно, обеспечивая при изготовлении непрерывность поворота зазора на всей длине пространства взаимодействия – от начала зазора во входном резонаторе до окончания зазора в выходном резонаторе (см. рис. 17). Получен патент на данную конструкцию.

В § 4.4 рассматриваются различные виды электронных пушек ЦЗУ применительно к используемым в них концентраторам магнитного поля и целесообразность их использования для различных диапазонов рабочих частот.

В § 4.5 показан пример использования в ЦЗУ управляемой фазосдвигающей секции, которая была использована в экспортном варианте ЦЗУ в диапазоне частот 14,7 ГГц. В данном типе ЦЗУ разделительная секция, расположенная между входным и выходным резонаторами, была выполнена в виде изолированного электрода,

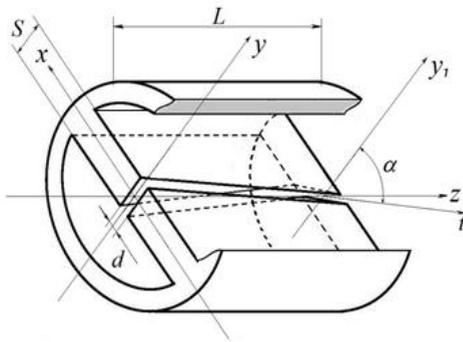


Рис. 17. Схематическое изображение поворота электронного зазора на длине двух резонаторов. Плоскость «ленты» электронного луча на входе в зазор входного резонатора ($z = 0$) лежит в плоскости yOz , на выходе из зазора выходного резонатора ($z = L$) совпадает с плоскостью tO_1z , α – суммарный угол поворота плоскости зазора на длине пространства взаимодействия.

потенциал на котором мог регулироваться и, таким образом, изменялась электрическая длина ЦЗУ. Недостаток конструкции – электрические линзы на входе и выходе фазосдвигающей секции, которые могли ухудшать коэффициент шума устройства.

В главе 5 рассматриваются вопросы применения ЦЗУ в аппаратуре приемников РЛС.

В § 5.1 показано, что использование на входе ЦЗУ в качестве антенного переключателя четырехплечего ферритового циркулятора (соседнее с ЦЗУ плечо нагружено согласованной нагрузкой) является наиболее оптимальным вариантом для обеспечения параметров ЦЗУ: хорошее согласование с внешней нагрузкой в режиме пропускания сигнала обеспечивает удаление тепловых шумов из БЦВ во входном резонаторе, поглощение отраженной от ЦЗУ в режиме защиты мощности высокого уровня без нагревания элементов тракта, по которым распространяется полезный сигнал, минимизация времени восстановления ЦЗУ без переотражений входной мощности высокого уровня.

В § 5.2 рассмотрены вопросы построения комплексированного усилителя на базе ЦЗУ.

Для усиления принимаемого сигнала на выходе ЦЗУ используется малошумящий усилитель (МШУ). Коэффициент шума пары данных устройств существенно зависит от согласования выходного тракта ЦЗУ с входным трактом МШУ. Поэтому обеспечение оптимального согласования и индивидуальная подстройка двух данных приборов в рамках единого циклотронно-защищенного комплексированного усилителя (ЦЗКУ), минимизация коэффициента шума при совместной подстройке, – все это является несомненным

преимуществом такого устройства. Коэффициент шума ЦЗКУ является вполне стабильным параметром вследствие достаточно высокого коэффициента усиления устройства (обычно не менее 20 дБ). По этой причине ЦЗУ, как правило, поставляется заказчиком в составе ЦЗКУ или целого приемного устройства. В максимальной комплектации в ЦЗКУ помимо ЦЗУ и МШУ входят блок режимов, источник вторичного электропитания, фильтры пульсаций питающих напряжений (см. рис. 18, 19).



Рис. 18. Обобщенная структурно-функциональная схема ЦЗКУ. На рисунке обозначены: АТТ – аттенюатор, ИВЭП – источник вторичного электропитания, Блок режимов – режим выключения электронного луча ЦЗУ, Бланк по МШУ – режим выключения электропитания МШУ, УМШ – режим увеличенной мощности шумов на выходе.



Рис. 19. Фото ЦЗКУ диапазона длин волн 3 см. Фланец входного волновода совмещен с крепежным фланцем ЦЗКУ (расположен снизу).

В Заключение отмечается, что задача создания циклотронных защитных устройств СВЧ диапазона к настоящему моменту в целом решена.

Приведены основные выводы по работе:

1) В ЦЗУ отсутствуют пики просачивающейся мощности, характерные для газоразрядных, полупроводниковых и других типов автономных защитных устройств. При работе ЦЗУ в режиме пропускания передача сигнала с входа на выход осуществляется посредством возбуждения БЦВ электронного луча. При переходе устройства в режим защиты максимальная мощность, способная попасть на выход ЦЗУ, определяется энергетической емкостью луча в форме БЦВ.

2) Принцип действия и конструкция ЦЗУ определяют еще два важных качества данного типа ЗУ:

- способность защищать последующие каскады аппаратуры в выключенном состоянии: при отсутствии питающих напряжений, а, следовательно, и электронного луча, ЦЗУ находится в режиме защиты;
- принципиальную невозможность пропуска входных импульсов мощности в отличие от газоразрядных ЗУ.

3) Рабочая полоса частот ЦЗУ определяется частотным диапазоном, в пределах которого выполняется на приемлемом уровне условие комплексно-сопряженного согласования проводимостей внешней нагрузки, резонатора связи и электронного луча в зазоре резонатора. Расширение рабочей полосы частот требует уменьшения угла пролета электронами рабочего зазора и увеличения характеристического сопротивления резонатора.

4) Частотная избирательность ЦЗУ связана с тем, что активная и реактивная составляющие электронной проводимости спадают при отстройке от полосы рабочих частот и при этом имеют пульсирующий по частоте характер, что приводит к рассогласованию проводимостей и увеличению ослабления передаваемого сигнала. Более того, активная составляющая электронной проводимости на определенных частотах стремится к нулю.

5) Нули активной проводимости электронного луча, возбужденного на БЦВ, на частотах, соответствующих отстройке по углу пролета от циклотронного резонанса на $2n\pi$ радиан, где $n = \pm 1, \pm 2, \dots$, (другими словами – на частотах, отстоящих от циклотронного резонанса на величину, обратную времени пролета электронами зазора резонатора, и кратную ей) обусловлены тем, что «спираль» центра масс последовательности поперечных сечений электронного луча на длине зазора резонатора имеет целое количество витков, что не позволяет наводить в резонаторе ВЧ ток при циклотронном вращении указанной спирали.

6) Уровень продольного магнитного поля, обеспечивающий циклотронный резонанс на рабочей частоте ЦЗУ, при типичных параметрах электронного луча превышает уровень Бриллюэновского магнитного поля приблизительно в два раза на рабочей частоте 2 ГГц и пропорционально возрастает с увеличением рабочей частоты ЦЗУ. Это обеспечивает жесткое удержание электронного луча в пролетном канале для ЦЗУ диапазона частот 4 ГГц и выше, для ЦЗУ диапазона частот менее 4 ГГц следует принимать меры по снижению плотности заряда электронного луча и обеспечению повышенного запаса по превышению рабочего уровня магнитного поля относительно Бриллюэновского.

7) Вследствие влияния поля пространственного заряда электронного луча колебания рассеянных электронов луча происходят на частоте несколько ниже циклотронной частоты и в том случае, если попадают в рабочую полосу частот, формируют «шумовые пики», ухудшающие коэффициент шума ЦЗУ.

8) Диаметр циклотронного вращения рассеянных электронов, определяемый циклотронной частотой и энергией дрейфа луча, влияет на коэффициент шума следующим образом: если диаметр циклотронного вращения близок к величине электронного зазора в резонаторах ЦЗУ или превосходит его, то в этом случае электроны практически сразу оседают на ламелях и не оказывают значительного влияния на коэффициент шума. Рассеянные электроны с амплитудой циклотронных колебаний существенно меньше поперечного размера электронного зазора могут достаточно долго существовать в объеме электронного луча и наводить шумовые токи в выходном резонаторе ЦЗУ.

9) При неоптимальной работе коллектора ЦЗУ вторичные электроны, попадающие в зазор выходного резонатора из области коллектора, совершают шумовые колебания с частотами преимущественно вблизи циклотронной частоты и являются источником собственных шумов ЦЗУ. Данный режим с увеличенной мощностью шумов на выходе устройства является достаточно стабильным и в некоторых типах ЦЗУ используется в качестве специального режима для калибровки приемного тракта аппаратуры, в которой применяется устройство.

10) Для ЦЗУ разных типов в диапазоне частот от 2 ГГц до 15 ГГц параметры линейности и перехода в режим защиты в зависимости от диапазона частот имеют следующие значения:

- касание электронным лучом стенок зазора начинается при входных мощностях с уровнем - 12...- 4 дБмВт;

- верхняя граница линейности по входу при отклонении амплитудной характеристики от линейного закона на 1 дБ составляет - 5...+ 5 дБмВт;
- входная мощность, при которой ЦЗУ переходит в режим защиты с максимальным ослаблением, составляет величину от 0 дБмВт до 10...13 дБмВт при условии, что электронный луч не выходит за пределы электронного зазора по его ширине;
- максимальная мощность на выходе ЦЗУ диапазона частот до 15 ГГц при переходе в режим защиты не превышает +5...+10 дБмВт, в том числе и для конструкций ЦЗУ, в которых края ленточного луча выходят за пределы электронного зазора в ламелях резонаторов.

11) Режим защиты реализуется в ЦЗУ автономно, при увеличении входной СВЧ мощности до некоторого порогового уровня, при котором электронный луч полностью разрушается и перестает транслировать сигнал из входного резонатора в выходной. Ослабление входной мощности в режиме защиты определяется ослаблением при излучении ее из входного резонатора в выходной через щель для прохождения электронного луча, которая имеет запредельные размеры.

12) Тепловая нагрузка ЦЗУ в режиме защиты составляет приблизительно 10% от падающей СВЧ мощности, т.к. $\approx 90\%$ входной СВЧ мощности отражается от входного резонатора, не нагруженного электронным лучом. Отраженная СВЧ мощность должна поглощаться входным вентиляем или нагрузкой циркулятора.

13) Время восстановления параметров ЦЗУ определяется временем затухания колебаний ВЧ энергии, поступившей во входной резонатор к моменту окончания входного импульса (преимущественно – добротностью входного резонатора и рабочей частотой), а также временем пролета электронного луча от входного резонатора до выходного резонатора после восстановления прохождения луча.

14) Время восстановления ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц составляет приблизительно 10 нс, диапазона частот 3 ГГц – 22...26 нс. За дополнительное время от 3 до 10 нс в зависимости от диапазона частот в ЦЗУ восстанавливается максимальная чувствительность, соответствующая коэффициенту шума 1...1,5 дБ.

15) Отраженная от входа ЦЗУ в режиме защиты импульсная мощность может многократно переотражаться от входа ЦЗУ и других элементов СВЧ тракта и, таким образом, продлевать процесс восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ. Для исключения данного эффекта следует

использовать развязывающее устройство (ферритовый циркулятор) и располагать его по возможности ближе к ЦЗУ.

16) В ЦЗУ стандартных конструкций входная предельно-допустимая импульсная мощность достигает 10 кВт при средней мощности до 250...300 Вт и длительности импульса до 10...20 мкс. При принятии специальных конструктивных мер в диапазоне длин волн 10 см входная импульсная мощность может достигать 50 кВт при средней мощности 1,25 кВт и длительности импульса 60 мкс.

17) Увеличение электронной нагрузки резонаторов ЦЗУ и, соответственно, расширение рабочей полосы частот устройства может быть достигнуто посредством приближения стенок пролетного канала к электронному лучу за счет выполнения электронного зазора в паре резонаторов (входном и выходном) совместно, обеспечивая при изготовлении непрерывность поворота зазора на всей длине пространства взаимодействия согласно с поворотом «ленты» электронного луча в зазоре.

18) ЦЗУ обладает достаточно привлекательными параметрами электромагнитной совместимости, прежде всего в части подавления побочных каналов приема.

19) Циклотронно-защищенный комплексированный усилитель – это в значительной степени оптимальная по составу система, определяющая коэффициент шума приемного устройства РЛС и обеспечивающая надежную защиту от СВЧ мощности высокого уровня при сверхмалом времени восстановления.

20) Разработанные ЦЗУ имеют следующие основные электрические параметры:

- | | |
|--|----------------|
| – Коэффициент шума | 0,7...1,2 дБ |
| – Время восстановления | |
| – в диапазоне длин волн 3 см | ≈ 10 нс |
| – в диапазоне длин волн 10 см | ≈ 22...26 нс |
| – Верхняя граница линейности по входу | 0,3...3 мВт |
| – Максимальная выходная мощность ЦЗУ при переходе в режим защиты | < 8 мВт |
| – Типичная предельно-допустимая входная мощность: | |
| – импульсная | ≤ 10 кВт |
| – средняя | ≤ 250...300 Вт |
| – Ослабление входной мощности в режиме защиты | > 60...70 дБ |
| – Отсутствуют пики просачивающейся мощности. | |

Направление ЦЗУ в настоящее время занимает существенное и весьма важное место в современной СВЧ вакуумной электронике. Направление продолжает развиваться. Следует выделить ряд основных задач по совершенствованию ЦЗУ.

Первоочередные и крайне актуальные задачи:

- 1) Конструктивно-технологическая доработка и освоение производства ЦЗУ диапазона длин волн 8 мм.
- 2) Разработка ЦЗУ диапазона длин волн 3 см с уменьшенной приблизительно в три раза массой (приблизительно до 0,7 кг).

Задачи повышения надежности ЦЗУ:

- 3) Разработка конструктивно-технологических мер по обеспечению высокого уровня вакуума и отсутствию газоотделений в процессе эксплуатации ЦЗУ. Высокий уровень вакуума – принципиальное требование для обеспечения низкого коэффициента шума.
- 4) Стабилизация тока эмиссии катода в процессе эксплуатации ЦЗУ – технологические и конструктивные меры.

Задачи улучшения конструктивных и электрических параметров:

- 5) Снижение массы и габаритов ЦЗКУ путем объединения источника вторичного электропитания и блока режимов в единый блок.
- 6) Полное решение задачи по расчету (моделированию с использованием трехмерных пакетов программ) и на этой основе конструированию ЦЗУ с расширенной полосой частот за счет использования дополнительных резонансных контуров во входном и выходном СВЧ трактах.
- 7) Расширение полосы частот и увеличение верхней границы линейности ЦЗУ за счет внедрения в конструкцию резонаторов электронного зазора с поворотом, непрерывно распределенным по длине обоих резонаторов.
- 8) Проработка задачи по возможному увеличению диапазона рабочих частот ЦЗУ (или снижению массы ЦЗУ) при использовании квадрупольных входного и выходного резонаторов, что позволит устройству работать при циклотронной частоте (и уровне магнитного поля) в два раза ниже частоты сигнала.
- 9) Проработка задачи по исключению коаксиального участка входного и выходного трактов ЦЗУ и обеспечению необходимой связи волновода непосредственно с резонатором. Это позволит снизить потери сигнала вследствие повышенного сопротивления центрального проводника коаксиала малого диаметра, особенно в высокочастотных образцах ЦЗУ, а также повысить электрическую устойчивость устройства.

10) Проработка задачи по формированию входного и выходного резонаторов ЦЗУ непосредственно в волноводе входного или выходного СВЧ трактов при соответствующей трансформации волноводов, формировании в них емкостного зазора и пропускании через зазор электронного луча.

Список работ соискателя по теме диссертации

Публикации по теме диссертации в изданиях, индексируемых в международных базах данных

1. Быковский, С.В. О кинетической мощности поперечных волн электронного потока / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т.37. – №10. – С.1854-1858.
2. Быковский, С.В. Поперечные волны электронного потока в плоскосимметричных полях / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т.38 – №8. – С.1475-1482.
3. Быковский, С.В. Поперечные волны электронного потока в квадрупольном электрическом поле / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т.40. – №8. – С.1277-1281.
4. Будзинский, Ю.А. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.П. Кантюк, М.А. Мاستрюков // Радиотехника. – 1999. – №4. – С.32-40.
5. Boudzinski, I.A. Amplifying and Protective Devices Based on Electron Beam Fast Cyclotron Wave / I.A. Boudzinski, S.V. Bykovski // Proceedings of The 2nd IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2001. Noordwijk, The Netherlands, 2001. – P.153-156.
6. Vanke, V.A. Electron Beam Transverse Waves and Microwave Electronics / V.A. Vanke, Y.A. Budzinskiy, S.V. Bykovskiy // Abstracts of 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2006. Monterey, USA, 2006. – P.295-296.
7. Budzinskiy, Y.A. Cyclotron Protective Device with Increased Frequency Band / Y.A. Budzinskiy, S.V. Bykovskiy // Abstracts of 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2009. Rome, Italy, 2009. – P.60-61.
8. Borisov, A.A. The Development of Vacuum Microwave Devices in Istok / A.A. Borisov, U.A. Budzinsky, S.V. Bykovsky, A.V. Galdetskiy, A.N. Korolev, M.I. Lopin, A.A. Negirev, V.I. Pugnin, G.V. Ruvinsky,

V.V. Sazonov // Abstracts of 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2011. Bangalore, India, 2011. – P.437-438.

9. **Быковский, С.В.** Влияние рассеянных электронов на коэффициент шума циклотронных защитных устройств / С.В. Быковский // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т.47. – В.12. – С.51-54.
10. **Быковский, С.В.** Циклотронные защитные устройства СВЧ-диапазона для приемников РЛС / С.В. Быковский // РЭНСИТ. – 2021. – Т.13. – В.3. – С.297-302.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК

11. Будзинский, Ю.А. Усилительные и защитные приборы, работающие на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов // Вопросы радиоэлектроники. Серия "Общетеchnическая": Науч.-техн. сборник / ФГУП "ЦНИИ "Комета". – 2002. – В.2. – С.43-47.
12. Будзинский, Ю.А. Циклотронные защитные устройства для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, О.А. Саврухин, И.А. Шмелев // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2003. – В.1. – С.24-30.
13. Будзинский, Ю.А. Расчет рабочей полосы частот циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Г. Калина // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2010. – В.1. – С.70-87.
14. Калина, В.Г. Моделирование СВЧ циклотронного защитного устройства как трехзвенного фильтра / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2010. – В.4. – С.3-15.
15. Будзинский, Ю.А. Защитные устройства СВЧ-диапазона на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, Т.Ш. Сиухов, А.И. Тёхан // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – №7. – С.69-73.
16. Будзинский, Ю.А. Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, И.И. Голеницкий, В.Г. Калина // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2013. – В.3. – С.136-142.
17. Калина, В.Г. Расчет циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский,

- С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2014. – В.1. – С.19-38.
18. Калина, В.Г. Расчет циклотронного защитного устройства с подавлением зеркального канала / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2014. – В.4. – С.48-62.
 19. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Расчет связи с нагрузкой / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2016. – В.2. – С.8-12.
 20. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Расчет характеристического сопротивления резонатора / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2016. – В.3. – С.31-39.
 21. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Модель с автотрансформатором / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.1. – С.74-83.
 22. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. LCR-модель с индуктивным проводником вывода / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.3. – С.41-49.
 23. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Частотно-унитарная LCR-модель / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.4. – С.6-11.
 24. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Г. Калина, В.Е. Котов, О.А. Саврухин // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2018. – В.3. – С.43-49.
 25. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Модель с заданной полосой пропускания / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2019. – В.1. – С.44-56.
 26. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства: время восстановления параметров / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Г. Калина, В.Е. Котов, С.В. Николаев, О.А. Саврухин // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2020. – В.1. – С.12-21.

27. Быковский, С.В. Параметры электромагнитной совместимости циклотронно-защищенных комплексированных усилителей (ЦЗКУ) / С.В. Быковский, Т.И. Градова, М.Б. Орехов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2020. – В.1. – С.51-54.

Патенты

28. Патент № 2024098 РФ, МПК H01J 23/08 (1990.01). Магнитная система электровакуумного прибора СВЧ : № 4900352/21 : заявл. 08.01.1991 : опубл. 30.11.1994 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Мурсков А.А.
29. Патент № 2119691 РФ, МПК H01J 25/00 (1995.01). Циклонный преобразователь СВЧ-энергии : № 97 97103772 : заявл. 12.03.1997 : опубл. 10.11.2016 / Быковский С.В., Кывылинский Ю.Ф., Семенович В.Д., Ванке В.А., Будзинский Ю.А., Саввин В.Л.
30. Патент на полезную модель № 43405 РФ, МПК H01J 25/78 (2000.01). Циклотронно-защищенное комплексированное устройство (ЦЗКУ) : № 2003110309/22 : заявл. 10.04.2003 : опубл. 10.01.2005 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Вильданов С.А.
31. Патент № 2319274 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/36 (2006.01), H01J 25/00 (2006.01). Циклотронное защитное устройство с увеличенной полосой рабочих частот : № 2006123002/09 : заявл. 28.06.2006 : опубл. 10.03.2008 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Конов М.А., Хахалкин В.Н., Шапотковский Ю.В.
32. Патент № 2453018 РФ, МПК H02H 7/00 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2010140806/07 : заявл. 05.10.2010 : опубл. 10.06.2012 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Калина В.Г.
33. Патент № 2530746 РФ, МПК H02H 7/00 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2013117623/07 : заявл. 16.04.2013 : опубл. 10.10.2014 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Голеницкий И.И., Духина Н.Г., Шерстяных Р.И.
34. Патент № 2631923 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/34 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2016114977 : заявл. 18.04.2016 : опубл. 29.09.2017 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Голеницкий И.И., Духина Н.Г.
35. Патент № 2731297 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/36 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное

устройство : № 2020103845 : заявл. 28.01.2020 : опубл. 02.09.2020 /
Быковский С.В.

Другие работы по теме диссертации

36. Будзинский, Ю.А. Электростатические усилители – основные параметры и особенности применения / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Саратов, 1994. – С.19-20.
37. Ванке, В.А. Преобразование поперечных волн электронного потока в параксиальных полях различной структуры / В.А. Ванке, С.В. Быковский // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Саратов, 1994. – С.20-21.
38. Vanke, V.A. Development of Cyclotron-Wave Converter / V.A. Vanke, V.L. Savvin, I.A. Boudzinski, S.V. Bykovski // Abstracts of The Second International Wireless Power Transmission Conference, WPT'95. Kobe, Japan, 16-19 October, 1995. P.3-3.
39. Быковский С.В. Теоретическое исследование процессов энергообмена поперечных волн электронного потока и на этой основе исследование и разработка электронных защитных устройств на быстрой циклотронной волне с малым (порядка 10^1 нс) временем восстановления: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.02 / Быковский Сергей Васильевич. – Фрязино, 1996. – 134 с.
40. Будзинский, Ю.А. Комплексированные усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, Д.Н. Грудцов, Н.В. Ильичев, О.А. Саврухин, И.А. Шмелев // Материалы 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2001. Севастополь, 2001. – С.190-192.
41. Голеницкий, И.И. Моделирование трехмерной электронно-оптической системы циклотронного защитного устройства / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2001. Севастополь, 2001. – С.216-217.
42. Голеницкий, И.И. Формирование высокоперевансных тонких ленточных электронных потоков в слабых магнитных полях / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский //

- Материалы 13-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2003. Севастополь, 2003. – С.291-293.
43. Будзинский, Ю. Нетрадиционная вакуумная СВЧ-электроника на основе поперечных волн электронного потока / Ю. Будзинский, С. Быковский, В. Ванке // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – №4. – С.38-42.
44. Будзинский, Ю.А. Об увеличении полосы рабочих частот циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Е. Котов, О.А. Саврухин // Материалы 15-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2005. Севастополь, 2005. – С.205-206.
45. Будзинский, Ю.А. Инженерный расчет циклотронных защитных устройств / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Г. Калина // Материалы 24-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2014. Севастополь, 2014. – С.159-160.
46. Будзинский, Ю.А. Электронно-оптическая система циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина // Материалы 24-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2014. Севастополь, 2014. – С.157-158.
47. Голеницкий, И.И. Электронно-оптическая система циклотронного защитного устройства 8-мм диапазона длин волн / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы 25-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2015. Севастополь, 2015. – С.181-182.
48. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства СВЧ / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Е. Котов, С.В. Николаев, О.А. Саврухин // Материалы 30-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2020. Севастополь, 2020. – С.49-50.