

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Быковского Сергея Васильевича «Циклотронные защитные устройства приемников радиолокационных систем сверхвысокочастотного диапазона», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.1 – «Вакуумная и плазменная электроника»

### 1. Актуальность темы диссертации

Тема диссертации относится к области сверхвысокочастотной радиоэлектроники, а именно к разработке защитных устройств (ЗУ) входных каскадов СВЧ приемников радиолокационных станций (РЛС), работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Защитные устройства (ЗУ) должны обладать целым рядом специфических требований, необходимых для обеспечения стабильной и эффективной работы современных РЛС. К числу таких требований следует отнести - предельно малое время восстановления параметров ЗУ после окончания СВЧ-импульса; малый коэффициент шума в рабочей полосе частот; широкий динамический диапазон; высокую амплитудную и фазовую линейность; глубокую развязку входа и выхода устройства в режиме защиты. Данные требования являются крайне важными для обеспечения эффективной работы РЛС военного назначения.

Всем этим требованиям в значительной степени могут удовлетворить циклотронные защитные устройства (ЦЗУ), работающие на быстрой циклотронной волне (БЦВ) электронного потока в диапазонах частот от 2 ГГц до 15 ГГц. Принцип работы этих электровакуумных устройств основан на взаимодействии электронного потока с поперечным СВЧ электрическим полем резонаторной системы. Данный тип приборов обладает очевидным преимуществом по временным параметрам перед традиционными защитными устройствами – газоразрядными, полупроводниковыми и другими, в которых подвижность заряженных частиц существенно ниже.

Научно-технический прогресс в области радиотехнических систем требует дальнейшего обновления технической структуры РЛС. Вновь создаваемые ЦЗУ должны обладать лучшими показателями качества, более широкими функциональными возможностями и, в большей степени, удовлетворять современным требованиям, предъявляемым к РЛС военного назначения.

Разработка, исследование и создание таких циклотронных защитных устройств представляет собой крупную научно-техническую проблему, важную для повышения оборонного потенциала страны. Таким образом, можно утверждать, что тема исследований, представленных в диссертационной работе С.В. Быковского, несомненно, является важной и актуальной.

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Класс циклотронных защитных устройств является оригинальным направлением в вакуумной СВЧ электронике и развивается на единственном предприятии в мире – в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Обоснованность полученных результатов, сформулированных в диссертации положений, выводов и рекомендаций подтверждена большим количеством проведенных экспериментов, проведенных на этом предприятии; хорошим совпадением полученных теоретических оценок электрических параметров разработанных ЦЗУ с результатами проведенных экспериментальных измерений. Высокую степень обоснованности полученных рекомендаций подтверждает также многолетний опыт серийного производства этих устройств и опыт применения их в действующей аппаратуре РЛС.

Результаты исследований хорошо известны специалистам в области вакуумной СВЧ электроники. Они прошли хорошую апробацию посредством докладов автора на многих всероссийских и международных научно-технических конференциях, отражены в статьях, опубликованных в достаточном числе ведущих научно-технических журналов, а также и патентах на изобретения.

## **3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов.**

*Степень достоверности* полученных результатов высока. Она обеспечивается - использованием комплекса хорошо апробированных аналитических методов электроники и электродинамики для анализа

эффективности физических процессов преобразования и взаимодействия поперечных волн электронного луча с резонаторными структурами; применением современных компьютерных программ 3D моделирования высокочастотных структур; использованием аттестованного радиоизмерительного оборудования и стандартных методик для исследования электрических параметров ЦЗУ. Результаты исследований, в частных случаях, хорошо согласуются с известными литературными данными.

*Новыми научными результатами*, полученными в ходе работы над диссертацией, являются:

- результаты экспериментальных исследований, подтверждающие, что в ЦЗУ отсутствует пик просачивающейся на выход СВЧ мощности, характерный для других типов ЗУ;

- показано, что время восстановления ЦЗУ определяется преимущественно добротностью входного резонатора и рабочей длиной волны, причем в диапазоне длин волн 3 см это время составляет приблизительно 10 нс;

- найдены границы и причины нарушения линейности амплитудной характеристики ЦЗУ в режиме передачи сигнала за счет оседания электронов луча на стенках пролетного канала (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;

- установлено, что 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 и плотности пространственного заряда луча;

- доказано, что увеличение электронной нагрузки резонаторов ЦЗУ и, соответственно расширение рабочей полосы частот устройства, может быть достигнуто посредством приближения стенок пролетного канала к электронному лучу. Это можно осуществить за счет выполнения электронного зазора в паре

#### **4. Научная и практическая значимость результатов.**

*Научная значимость результатов* заключается в том, что предложенные автором идеи, рекомендации, и технические решения, изложенные в 8 патентах, могут быть использованы при конструировании новых более совершенных ЦЗУ, работающих в коротковолновой части СВЧ диапазона и обладающих улучшенными показателями качества, а также более широкими функциональными возможностями, удовлетворяющими современным требованиям, предъявляемым к РЛС военного назначения.

*Практическая значимость* работы состоит в том, что полученные научно-технические результаты позволили создать около 20 типов ЦЗУ и циклотронно-защищенных комплексированных усилителей, большинство из которых выпускаются в настоящее время серийно и поставляются ряду предприятий радиолокационного профиля. Использование ЦЗУ в современных радиолокационных системах позволяет достигать параметров, обеспечивающих лидирующие позиции Российской радиолокации.

#### **5. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите.**

Диссертация С.В. Быковского полностью соответствует специальности 2.2.1 – «Вакуумная и плазменная электроника» отрасли технические науки.

#### **6. Полнота опубликования основных положений и результатов**

По материалам диссертации С.В. Быковским опубликовано 10 работ, индексируемых в международных базах данных, 17 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, получено 8 патентов РФ, опубликовано 13 работ в других научных изданиях. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на многих всероссийских и международных конференциях. Публикации в полной мере раскрывают основные положения и результаты работы.

Автореферат также в необходимой степени раскрывает основное содержание диссертации. Приведенные в нем рисунки тщательно подобраны и наглядно иллюстрируют полученные автором результаты.

## 7. Структура и оценка содержания диссертации.

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы. Общий объем диссертации составляет 228 страниц, включая список литературы из 136 наименований, 59 рисунков и 4 приложения.

Диссертация четко структурирована. Каждая глава посвящена решению конкретной задачи, что облегчает восприятие материала.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования; формулируется цель и основные задачи работы; описывается предлагаемый автором подход к решению поставленных задач; характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация. Кроме того, дается краткое изложение содержания диссертации.

В главе 1 представлен обзор СВЧ защитных устройств (ЗУ) приемников РЛС. Кратко рассмотрены назначение и основные задачи ЗУ, существующие типы ЗУ и их определяющие параметры.

В главе 2 рассмотрены особенности физических процессов, происходящих при работе циклотронного защитного устройства. Рассмотрение ведется для трех режимов работы - режим пропускания сигнала, режим защиты, когда электронный луч разрушен под действием входной СВЧ мощности и переходный режим, который имеет место при переходе из режима пропускания в режим защиты ЦЗУ. Даны аналитические оценки возможности достижения требуемых параметров и характеристик ЦЗУ.

В главе 3 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния различных конструктивных и электрических параметров ЦЗУ (рабочей частоты, тока электронного луча, геометрических размеров электронного зазора и поперечного сечения электронного луча в зазоре) на коэффициент шума, амплитудную и фазовую линейность и время восстановления прохождения сигнала.

В главе 4 рассмотрены вопросы конструирования основных элементов ЦЗУ - магнитной фокусирующей системы, входного коаксиального волновода, электронно-оптической и резонаторной систем. Рассмотрены различные виды электронных пушек ЦЗУ применительно к используемым в них концентраторам

магнитного поля и обоснована целесообразность их использования для различных диапазонов рабочих частот.

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

В Заключении приведены основные выводы по работе и даны рекомендации для дальнейшего улучшения конструктивных и электрических параметров ЦЗУ при работе их в новых частотных диапазонах при расширенных функциональных возможностях.

#### **8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.**

Объем, содержание и качество полученных результатов, а также их практическая и научная значимость позволяют сделать заключение о том, что квалификация Быковского Сергея Васильевича соответствует ученой степени доктора технических наук.

#### **9. Соответствие содержания автореферата основным положениям и выводам диссертации.**

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям и выводам диссертации. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с действующими требованиями ВАК РФ. Работа изложена ясным научным языком.

#### **10. Недостатки диссертации.**

1) В работе отсутствуют результаты численных расчетов или иных аналитических оценок электрической прочности ЦЗУ при воздействии на вход устройства предельной СВЧ мощности, как импульсной, так и средней.

2) На стр. 121 приведено условие допустимости использования критерия квазистационарности для расчета параметров объемных СВЧ резонаторов (время распространения возмущения вдоль контура  $\tau$  также должно быть существенно меньше периода колебаний  $T$ ). Анализируя исследуемый резонатор, автор работы, приходит к выводу, что при длине контура  $l \approx (0,5...1) \cdot 10^{-2}$  м, времени распространения возмущения  $\tau \approx (1,5...3) \cdot 10^{-11}$  и периоде колебаний  $T \approx 10^{-10}$  с. условие квазистационарности не выполняется. Однако, далее, (для оценки времени снижения СВЧ мощности в резонаторе), он все же, считает, что параметры

рассматриваемого резонатора Куччия могут быть рассчитаны через параметры колебательного контура с сосредоточенными параметрами.

3) В работе утверждается, что наиболее эффективным путем расширения полосы рабочих частот ЦЗУ является – уменьшение величины электронного зазора  $d$  между ламелями (см. рис. 3.6) до величины, при которой исключается токооседание. Однако какой должна быть величина коэффициента заполнения пролетного канала для ленточного пучка в магнитном поле, и как ее контролировать на практике в диссертации не указано.

4) Имеется ряд замечаний орфографического характера. В ряде формул (2.7)...(2.9), (2.19...2.20) отсутствуют разделительные запяты. В тексте (стр.61,стр.77,стр.118) встречается неудачное, на мой взгляд, выражение «частота 2-х нулей активной электронной проводимости».

Тем не менее, приведенные выше замечания не носят принципиального характера и не снижают научной новизны, практической значимости и достоверности научных результатов, полученных соискателем.

#### **Заключение.**

Диссертация С.В. Быковского «Циклотронные защитные устройства приемников радиолокационных систем сверхвысокочастотного диапазона» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании предложенных автором новых научно обоснованных технических и технологических решений решена важная для вакуумной СВЧ электроники научная проблема создания высокоэффективных циклотронных защитных устройств приемной радиоаппаратуры современных радиолокационных систем. Считаю, что диссертация Быковского Сергея Васильевича «Циклотронные защитные устройства приемников радиолокационных систем сверхвысокочастотного диапазона» соответствует всем требованиям ВАК – п.п. 9 - 14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

**Официальный оппонент,**

доктор технических наук, профессор по кафедре  
электронных приборов и устройств,  
профессор кафедры "Электронные приборы  
и устройства" Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Саратовский  
государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.»

  
(подпись) /В.А.Царев/  
(Ф.И.О.)

Подпись Владислава Алексеевича Царева заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»

доктор культурологии, доцент  
  
(подпись) /Н.В. Тищенко/  
(Ф.И.О.)

**Адрес:** 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77,  
«Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.»

**Адрес сайта:** [http://www.sstu.ru/teachers/2450-  
tsarev\\_vladislav\\_alekseevich.html](http://www.sstu.ru/teachers/2450-tsarev_vladislav_alekseevich.html)

**Телефон:** +79172161534

**e-mail:** tsarev\_va@mail.ru