

На правах рукописи



Романченко Илья Викторович

**Возбуждение мощных  
высокочастотных колебаний  
в линии с насыщенным ферритом**

01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в *Учреждении Российской академии наук  
Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН*

Научный руководитель: *доктор физ.-мат. наук,  
старший научный сотрудник,  
Владислав Владимирович Ростов  
(ИСЭ СО РАН)*

Официальные оппоненты: *доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Александр Андреевич Ким  
(ИСЭ СО РАН)*

*доктор физ.-мат. наук,  
старший научный сотрудник,  
Игорь Игоревич Винтизенко  
(ФТИ ТПУ)*

Ведущая организация: *Институт электрофизики Уральско-  
го отделения РАН (ИЭФ УрО РАН)*

Защита состоится «16» декабря 2011 г. в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.031.01 при *Учреждении Российской ака-  
демии наук Институте сильноточной электроники СО РАН* по адресу:  
*634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Учреждения Россий-  
ской академии наук Института сильноточной электроники СО РАН.*

Автореферат разослан «03» ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

*доктор физико-математических наук*  *В. В. Рыжов*

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

На протяжении последних двух десятилетий мощная СВЧ электроника прошла серьезный путь развития. Выходные параметры наиболее перспективных мощных СВЧ генераторов были доведены до рекордно высоких значений. Среди генераторов гигаваттного уровня мощности можно выделить группу с большой энергией в импульсе,  $>100$  Дж [1]. Сюда входят релятивистский клистрон, релятивистский магнетрон, магнито-изолированный линейный осциллятор (MILQ), релтрон, многоволновый черенковский генератор, релятивистский генератор дифракционного излучения и др. Среди гигаваттных генераторов с энергией в импульсе  $<100$  Дж особое положение занимают импульсно-периодические генераторы черенковского типа [2], такие как релятивистская лампа обратной волны, лампа бегущей волны а также виркатор. Как видно, все эти приборы основаны на использовании энергии мощного релятивистского электронного пучка. Это накладывает ряд ограничений. Во-первых необходимы специальные меры по защите от рентгеновского излучения. Другая проблема связана с временем жизни катода, который деградирует за счет переноса материала при взрывной эмиссии. Для дециметрового диапазона длин волн дополнительные требования возникают к масштабам релятивистских источников, что связано с время-пролетным характером возбуждения электромагнитного излучения. Альтернативным решением может стать использование твердотельной активной среды. Для того, чтобы в твердом теле эффективно возбудить электромагнитные волны высоковольтным импульсом напряжения, среда должна обладать сильно нелинейными электрическими или магнитными свойствами. Одним из наиболее обещающих воплощений такого подхода является использование нелинейных линий [3–6].

Возбуждение ВЧ колебаний в нелинейных линиях происходит за счет неустойчивости крутого фронта ударной электромагнитной волны к синхронной с ним ВЧ волне [7]. Неустойчивость фронта обусловлена дисперсией нелинейной линии, которая бывает двух типов: пространственная [3, 5] и временная [8, А1]. Возможность прямого эффективного преобразования видеоимпульса в радиоимпульс была продемонстрирована для нелинейной линии с пространственной дисперсией [5]. При этом мощность в радиоимпульсе не превышала нескольких десятков МВт, а длина линии составляла несколько метров. Особенности возбуждения радиоимпульсов в таких линиях были подробно исследованы [9].

Новым этапом в развитии нелинейных линий стало создание гироманитной линии с NiZn ферритом, в которой возбуждались высокочастотные (ВЧ) колебания с мощностью в несколько сотен МВт [А1]. Детальное исследование закономерностей возбуждения ВЧ колебаний в таких линиях позволит создать новый тип импульсно-периодических генераторов радиоимпульсов. Основными элементами таких генераторов являются источник высоковольтных наносекундных импульсов типа СИНУС [10], гироманитная линия с NiZn ферритом, фильтр высоких частот, излучающая антенна. Прототип такого генератора уже создан и опробован [А2].

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является исследование основных закономерностей возбуждения ВЧ колебаний ударным фронтом высоковольтного импульса в коаксиальной линии с насыщенным ферритом.

### **Научная новизна**

1. Показано, что при распространении высоковольтного импульса с ударным фронтом субнаносекундной длительности по коаксиальной линии с NiZn ферритом, насыщенным внешним продольным полем, происходит рост мощности возбуждаемых ВЧ колебаний с увеличением длины ферри-

тового заполнения. На некоторой длине ВЧ мощность перестает расти. При этом формируется квазистационарная форма импульса в виде затухающих колебаний.

2. Показано, что при увеличении амплитуды азимутального магнитного поля трапецевидного высоковольтного импульса, бегущего по коаксиальной линии с насыщенным NiZn ферритом, от 20 кА/м до 100 кА/м происходит монотонный рост центральной частоты возбуждаемых колебаний от 0.6 ГГц до 1.8 ГГц.

3. Показана возможность электронного управления центральной частотой возбуждаемых колебаний  $\sim 15\%$  по уровню -3 дБ за счет изменения внешнего магнитного поля в диапазоне от 20 кА/м до 70 кА/м. Причем повышению внешнего поля соответствует спад центральной частоты.

4. Показано, что в приближении стационарной волны для коаксиальной линии с насыщенным ферритом без учета затухания в феррите частота колебаний тока спадает с ростом продольного магнитного поля. На основании модели показано, что максимальная пиковая мощность импульса на выходе ферритовой линии может быть не более чем в два раза больше мощности падающего импульса.

### **Практическая значимость**

Исследования закономерностей преобразования энергии высоковольтного видеоимпульса в радиоимпульс в коаксиальной линии с насыщенным NiZn ферритом заложили основу для создания нового типа импульсно-периодических источников мощных радиоимпульсов. Экспериментально найдены оптимальные параметры нелинейных линий, позволяющие получать радиоимпульсы с пиковой мощностью несколько сотен МВт и длительностью несколько наносекунд на частоте около 1 ГГц с шириной спектра 0.5 ГГц по уровню -10 дБ. Показана возможность получать близкие к указан-

ным энергетические параметры радиоимпульсов с центральными частотами в диапазоне от 0.6 ГГц до 1.8 ГГц. Данный частотный диапазон удалось перекрыть при использовании двух нелинейных линий с разными геометриями.

На основе проведенных исследований разработан импульсно-периодический генератор радиоимпульсов с центральной частотой  $\sim 1$  ГГц и пиковой мощностью в гауссовом пучке  $\sim 200$  МВт на частоте повторений 200 Гц. В состав генератора радиоимпульсов входят источник высоковольтных импульсов СИНУС-200 с мощностью в падающем импульсе 2.5 ГВт, нелинейная линия с насыщенным ферритом, полосовой фильтр и излучающая антенна. Поскольку энергия в падающем импульсе составляет около 20 Дж, а энергия в излученном импульсе не превышает 0.6 Дж, то энергетический КПД такого устройства не превышает 3%.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. При распространении высоковольтного импульса по коаксиальной линии с NiZn ферритом, насыщенным внешним продольным полем, происходит рост мощности возбуждаемых ВЧ колебаний с увеличением длины ферритового заполнения, завершающийся формированием квазистационарной формы импульса с затухающими колебаниями. Для выбранных экспериментальных условий длина, на которой формируется квазистационарная форма импульса составляет около 1 м, пиковая ВЧ мощность достигает значений  $0.6 \div 0.7$  ГВт для мощности падающего импульса  $\sim 3$  ГВт, амплитуда ВЧ колебаний спадает в  $e$  раз за  $\sim 3 \div 4$  нс.

2. Изменение усредненного по радиусу азимутального магнитного поля в феррите от 20 кА/м до 100 кА/м позволяет монотонно увеличивать центральную частоту возбуждаемых колебаний от 0.6 ГГц до 1.8 ГГц. Ширина спектра по уровню - 10 дБ при этом составляет  $\sim 0.5$  ГГц. Для выбранных экспериментальных условий этот частотный диапазон был перекрыт в двух

нелинейных линиях с разной геометрией за счет изменения амплитуды высоковольтного импульса.

3. Изменение внешнего магнитного поля в диапазоне от 20 кА/м до 70 кА/м регулированием тока в соленоиде позволяет управлять центральной частотой возбуждаемых колебаний в пределах  $\sim 15\%$  по уровню -3 дБ. Причем повышению внешнего поля соответствует спад центральной частоты колебаний.

4. Система уравнений для коаксиальной линии с насыщенным ферритом без учета затухания в феррите в приближении стационарной волны сводится к двум уравнениям нелинейных осцилляторов для намагниченности и тока, из которых следует, что частота колебаний осцилляторов нарастает с ростом азимутального магнитного поля и спадает с ростом продольного. На основании модели показано, что пиковая мощность импульса на выходе ферритовой линии может быть не более, чем в два раза больше мощности падающего импульса.

### **Апробация работы**

Описанные в диссертации научные результаты докладывались на: семинарах ИСЭ СО РАН, на 35-й международной конференции IEEE по науке о плазме — ICOPS 2008, на 16-й Саратовской зимней школе-семинаре по СВЧ-электронике и радиофизике 2009, на 17-й международной конференции IEEE по мощной импульсной энергетике — PPC 2009, на 16-й международном симпозиуме по сильноточной электронике SHCE 2010; на в 18-й международной конференции IEEE по мощной импульсной энергетике — PPC 2011, а также на конкурсах работ молодых ученых ИСЭ СО РАН в 2008 и 2009 годах.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах [A1-A9], из них 4 статьи в рецензируемых журналах, 1 статья в сборниках трудов конференций и 4 тезиса докладов.

**Личный вклад автора** Основу диссертации составили работы [А1-А9], посвященные экспериментальному и теоретическому исследованию закономерностей возбуждения мощных ВЧ колебаний ударным фронтом высоковольтного импульса в коаксиальной линии с насыщенным ферритом. Эти работы содержат материалы исследований, выполненных в ИСЭ СО РАН в рамках грантов РФФИ и международных контрактов. Опубликованные работы написаны в соавторстве с сотрудниками, принимавшими участие в выполнении экспериментов. Автором внесен решающий вклад в проведение и анализ представленных в работах [А1, А2, А3, А6, А7, А9] экспериментов. Постановка экспериментов и их интерпретация проведены совместно с научным руководителем. В работах [А4, А5, А8] вклад соавторов равноценен.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 115 страниц, включая 68 рисунков и одну таблицу. Список литературы содержит 85 наименований.

## **Содержание работы**

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В Главе 1** кратко описан путь развития идеи использовать нелинейные передающие линии для генерации радиоимпульсов. Сделан обзор работ, посвященных разработке нелинейных передающих линий с пространственной дисперсией, и приведены параметры радиоимпульсов, полученных с их

помощью. Сделан обзор работ, посвященных исследованию коаксиальных линий с ненасыщенным и насыщенным ферритом. Дано описание физических основ генерации радиоимпульсов при импульсном перемагничивании феррита. Показана актуальность проведения исследований по теме диссертации и сформулированы основные задачи, требующие исследования.

**Глава 2** посвящена исследованию основных этапов формирования радиоимпульса при распространении высоковольтного импульса с фиксированной амплитудой по коаксиальной линии с NiZn ферритом, насыщенным внешним продольным полем.

Раздел 2.1 посвящен постановке эксперимента. Приводится общая схема экспериментальной установки, описывается методика измерения. Даны параметры падающего на нелинейную линию высоковольтного импульса, а также характеристики феррита. Описаны геометрии двух модификаций коаксиальных линий с ферритовыми кольцами двух типоразмеров. Приведены параметры соленоидов, намотанных на коаксиальные линии.

Раздел 2.2 посвящен исследованию формирования ударного фронта в коаксиальной линии с насыщенным ферритом. Найдено, что для параметров падающего импульса стационарный ударный фронт формируется на длине ферритовой линии  $\sim 20$  см. Приведена зависимость длительности стационарного фронта от величины поля подмагничивания. Показано, что длительность стационарного фронта примерно в два раза меньше периода возбуждаемых колебаний. Обнаружено, что в ферритовой линии, в которой ударный фронт не формируется из-за повышенной дисперсии жидкой изоляции, колебания не возбуждаются. Тем самым, экспериментально обосновывается необходимость ударного фронта для возбуждения колебаний.

Раздел 2.3 посвящен исследованию роста мощности ВЧ колебаний с длинной ферритового заполнения коаксиальной линии. Исследования проведены для двух типоразмеров ферритовых колец. Обнаружено, что для

обоих геометрий коаксиальных линий пиковая амплитуда колебаний линейно нарастает на участке линии от 20 до 60 см.

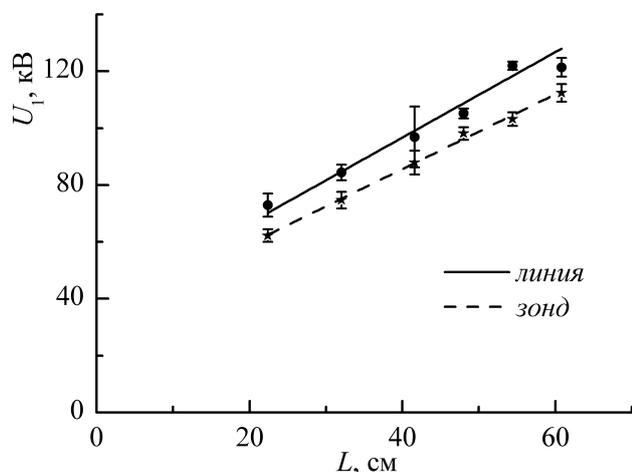


Рис. 1. Пиковая амплитуда колебаний в Геометрии 2 от длины,  $H_z = 48.3$  кА/м происходит остановка роста мощности колебаний. Предельная пиковая ВЧ мощность достигает значений  $\sim 0.6 \div 0.7$  ГВт для мощности падающего импульса  $\sim 3$  ГВт. Форма импульса при дальнейшем наращивании длины становится квазистационарной, Рис. 2.

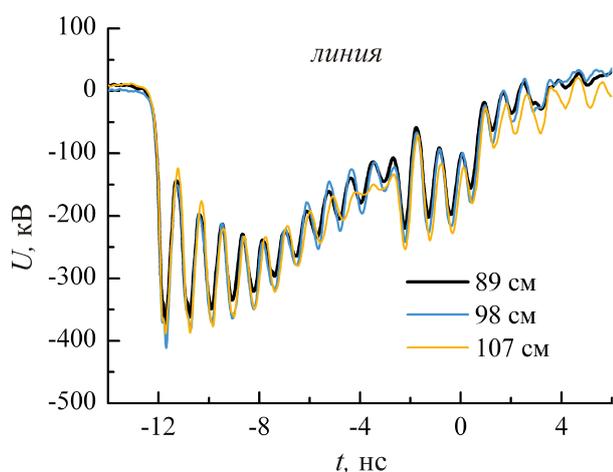


Рис. 2. Насыщение ВЧ-импульса НПЛ в Геометрии 1,  $H_z = 48.4$  кА/м

Для линии с меньшим диаметром соответствующая зависимость приведена на Рис. 1 (под надписями «линия» и «зонд» подразумеваются датчики напряжения, описанные в Приложении).

В разделе 2.4 приводятся результаты исследований по насыщению роста мощности ВЧ колебаний с длиной ферритового заполнения. Обнаружено, что на длине  $\sim 100$  см

В разделе 2.5 даются выводы ко второй главе.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A1, A2, A5, A6, A7, A8].

**Глава 3** посвящена экспериментальному исследованию возможностей управления частотой возбуждаемых колебаний.

Раздел 3.1 посвящен характеристикам спектра возбуждаемых колебаний. Обнаружено, что ширина спектра по уровню - 10 дБ составляет  $\sim 0.5$  ГГц.

Раздел 3.2 посвящен исследованию зависимости центральной частоты колебаний от продольного и азимутального магнитных полей. Показана возможность перестройки центральной частоты за счет поля подмагничивания в пределах  $\sim 15\%$  по уровню -3 дБ, Рис. 3 (штрихованные линии соответствуют спаду ВЧ-энергии на 3 дБ). Оптимальные поля подмагничивания находятся в диапазоне  $\sim 30 \div 60$  кА/м. Показана возможность изменять центральную частоту колебаний от 0.6 до 1.2 ГГц, меняя амплитуду падающего импульса от 80 до 290 кВ. Пиковая амплитуда колебаний при этом линейно нарастает от 40 до 170 кВ.

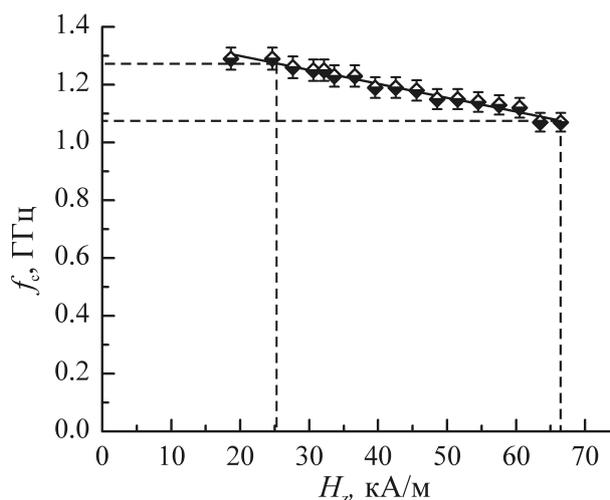


Рис. 3. Зависимость центральной частоты от продольного поля для Геометрии 1

В Разделе 3.3 описываются исследования нелинейной линии с насыщенным ферритом меньшего диаметра, в которой возбуждаются колебания на частоте 1.7 ГГц при максимальной амплитуде падающего импульса. Показана возможность получать фиксированный уровень выходной ВЧ мощности на более высокой частоте за счет уменьшения поперечных размеров системы. Показана возможность изменять центральную частоту колебаний от 1.2 до 1.8 ГГц, меняя амплитуду падающего импульса от 80 до 290 кВ.

На Рис. 4 приводится обобщение данных для двух линий, показывающее возможность возбуждать колебаний в диапазоне от 0.6 ГГц до 1.8 ГГц, увеличивая усредненное по сечению феррита азимутальное магнитное поле.

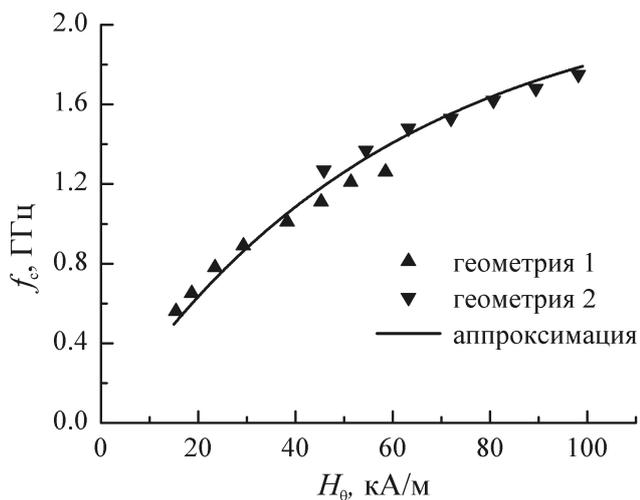


Рис. 4. Зависимость центральной частоты от азимутального поля

Раздел 3.4 посвящен исследованию влияния статических характеристик феррита на параметры возбуждаемых колебаний. Протестировано три типа NiZn феррита с различными характеристиками. Заметного влияния этих характеристик на параметры радиоимпульса не обнаружено.

В разделе 3.5 даются выводы ко третьей главе.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A1, A2, A7, A9].

**Глава 4** посвящена модели стационарной несинусоидальной периодической волны в коаксиальной линии без учета затухания в феррите.

В разделе 4.1 дается вывод системы уравнений, описывающих распространение волны в коаксиальной линии с насыщенным ферритом. Это телеграфные уравнения и уравнение Ландау-Лившица с учетом индукционных полей.

В разделе 4.2 рассматривается приближение стационарной волны без учета затухания в феррите. Дается вывод уравнения нелинейного осциллятора для тока, бегущего по коаксиальной линии. Фазовый портрет на Рис. 5 изображает нелинейные колебания безразмерного тока  $\sigma$  вокруг «центра»

$\sigma_1$ , соответствующего амплитуде падающего импульса. Дается вывод периода нелинейных колебаний.

В разделе 4.3 дается сравнение расчетных значений частоты ВЧ колебаний с экспериментальными. Обсуждается влияние индукционных полей на частоту. Показано, что учет индукционных полей завышает значение частоты в несколько раз по сравнению с экспериментальными значениями.

В разделе 4.4 исследуется зависимость периода нелинейных колебаний и скорости стационарной волны от величины продольного и азимутального магнитных полей. Показано качественное соответствие полученных результатов для периода с экспериментальными значениями.

В разделе 4.5 даются выводы к четвертой главе.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [А4, А9].

**В Главе 5** представлен импульсно-периодический источник мощных радиоимпульсов сверхширокополосного излучения на основе нелинейной линии с насыщенным ферритом.

Представлена конструкция источника, показанная на Рис. 6, вклю-

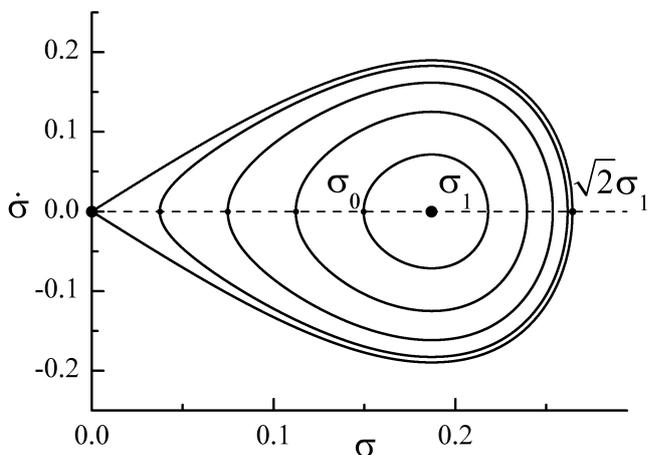


Рис. 5. Фазовый портрет для безразмерного тока

тока



Рис. 6. Внешний вид генератора радиоимпульсов

чающая в себя генератор высоковольтных импульсов СИНУС-200, нелинейную линию с насыщенным ферритом, полосовой фильтр и излучающую антенну.

В разделе 5.1 представлены результаты измерения параметров излучения генератора. В гауссовом пучке получены радиоимпульсы длительностью  $\sim 3 \div 4$  нс с пиковой мощностью  $\sim 260$  МВт и эффективным потенциалом излучения  $\sim 600$  кВ при центральной частоте спектра 1.2 ГГц (Рис. 7).

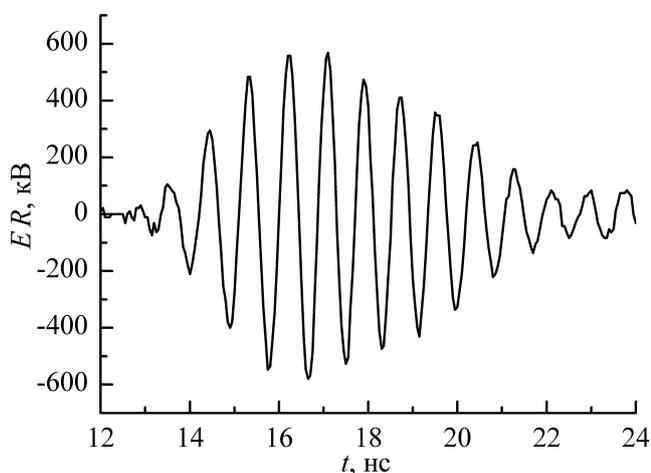


Рис. 7. Оциллограмма импульса излучения при входном напряжении 250 кВ

Первый датчик представляет собой последовательно соединенные резистивный и емкостной делители напряжения. Второй датчик является зондом, измеряющим производную от напряжения. Третий датчик представляет собой отрезок низкоомной коаксиальной линии, с которой снимается сигнал.

Показана стабильность работы генератора на частоте повторений импульсов 200 Гц при 1000 импульсов в пачке.

В разделе 5.2 даются выводы к пятой главе.

**В Заключение** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**В Приложении** описано устройство и параметры трех широкополосных датчиков высоковольтных импульсов, бегущих по коаксиальной

## Список публикаций

- A1. Губанов В. П., Гунин А. В., Ковальчук О. Б., Кутенков В. О., Романченко И. В. и Ростов В. В. Эффективная трансформация энергии высоковольтных импульсов в высокочастотные колебания на основе передающей линии с насыщенным ферритом // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 35, № 13. С. 81–87.
- A2. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Klimov A. I., Kurkan I. K. and Gunin A. V. Development of high power gyromagnetic nonlinear transmission lines // Abstracts. IEEE 18th Pulsed Power Conference. Chicago. IL. 2011. P. 40.
- A3. Афанасьев К. В., Ковальчук О. Б., Кутенков В. О., Романченко И. В. и Ростов В. В. Формирование субнаносекундного фронта высоковольтных импульсов в коаксиальной линии с ненасыщенным ферритом // ПТЭ. 2008. № 3. С. 86–90.
- A4. Романченко И. В., Ростов В. В. Энергетические уровни колебаний в нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом // ЖТФ. 2010. Т. 80, № 7. С. 111–114.
- A5. Rostov V. V., Bykov N. M., Bykov D. N., Klimov A. I., Kovalchuk O. B. and Romanchenko I. V. Generation of Subgigawatt RF Pulses in Nonlinear Transmission Lines // Plasma Sci., IEEE Trans. on. 2010. Vol. 38, no. 10. Pp. 2681–2685.
- A6. Kovalchuk O. B., Kutenkov V. O., Romanchenko I. V., Rostov V. V. Subnanosecond rise time of high voltage pulses in ferrite loaded coaxial line // Abstracts. IEEE 35th International Conference on Plasma Science. Karlsruhe. 2008. P.1

- A7. Romanchenko I. V., Kutenkov V. O., Rostov V. V. Effective transformation of high voltage power into high frequency oscillations based on transmission line with saturated ferrite // Abstracts. IEEE 36th International Conference on Plasma Science. San-Diego. CA. 2009. P.1
- A8. Rostov V. V., Bykov N. M., Bykov D. N., Klimov A. I., Kovalchuk O. B. and Romanchenko I. V. Generation of sub-GW RF pulses in nonlinear transmission lines // Abstracts. IEEE 17th Pulsed Power Plasma Science Conference. Washington. DC. 2009. P.1
- A9. Romanchenko I. V., Rostov V. V. Frequency of high Power RF-generation in nonlinear transmission lines with saturated ferrite // 16th International Symposium on High Current Electronics. 2010. Pp. 521–524.

## **Цитированная литература**

1. Barker R. J., Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies. Wiley-IEEE Press, 2001. 528 P.
2. Rostov V. V., Yalandin M. I., Mesyats G. A. Repetitive Production of Nanosecond Gigawatt Microwave Pulses // Plasma Sci., IEEE Trans. on. 2008. Vol. 36, no. 3. Pp. 655–660.
3. Бе́лянцев А. М., Дубнев А. И., Климин С. Л. и др. Генерация радиоимпульсов ударной электромагнитной волной в линии передачи с ферритом // ЖТФ. 1995. Т. 65. С. 132–142.
4. Darling J. D., Smith P. W. High power pulse burst generation by soliton-type oscillation on nonlinear lumped element transmission lines // IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference. 2007. Pp. 119–123.

5. Seddon N., Spikings C. R., Dolan J. E. RF pulse formation in nonlinear transmission lines // IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference. 2007. Pp. 678–681.
6. Gaudet J., Schamiloglu E., Rossi J. O. et al. Nonlinear Transmission Lines for High Power Microwave Applications - A Survey // IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2008. Pp. 131–138.
7. Seddon N., Bearpark T. Observation of the Inverse Doppler Effect // Science. 2003. Vol. 302. Pp. 1537–1540.
8. Фрейдман Г. И. О зависимости структуры ударных волн в двухпроводных линиях передачи от дисперсионной характеристики системы в линейном приближении // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. Т. 6. С. 536–550.
9. Козырев А. Б. Прямое преобразование видеоимпульса в радиоимпульс в линиях передачи на ферритах и на полупроводниковых гетероструктурах: Кандидатская диссертация / ИПФ РАН. 2001. 174 С.
10. Mesyats G. A., Korovin S. D., Gunin A. V. et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21, no. 2. Pp. 197–209.





---

Подписано к печати 01.11.2011 г. Формат 60x84 1/16

Тираж 80 экз. Заказ 1.

Отпечатано в ИСЭ СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3