

На правах рукописи



Романченко Илья Викторович

**Генерирование мощных
наносекундных импульсов
электромагнитного излучения
на основе линий с ферритом**

01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Научный консультант: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Ростов Владислав Владимирович

Официальные оппоненты: Зубарев Николай Михайлович — доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Новиков Сергей Автономович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор

Аржанников Андрей Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральное исследование исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита состоится 17 мая 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.031.01 при ИСЭ СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на сайте <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/dissertations.html>

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



Рыжов В. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Первые работы по исследованию распространения электромагнитных волн по нелинейным передающим линиям появились в конце 50-х годов прошлого века вскоре после освоения технологии создания ферритов. Уже в самых первых экспериментах по линиям с ферритом было обнаружено то, что впоследствии стали называть ударными электромагнитными волнами (УЭМВ) [1]. Основы общего теоретического описания процессов, приводящих к формированию УЭМВ, были заложены в начале 60-х в серии публикаций представителей Горьковской радиофизической научной школы [1–9]. И уже в тех работах на основе анализа структуры фазовой плоскости волновых уравнений для нелинейной передающей линии с временной дисперсией было указано на возможность возбуждения затухающих несинусоидальных колебаний за фронтом УЭМВ [1]. И хотя на возбуждение затухающих колебаний в передающей линии с ферритом, в которой временная дисперсия обусловлена возбуждением гиромангнитной прецессии при импульсном перемагничивании феррита, указывал еще в 1960 году Г. И. Фрейдман [10], первые эксперименты с двухпроводной линией с насыщенным ферритом не подтвердили эту возможность [11], и идея создать на основе этого эффекта источник радиоимпульсов реализована не была.

Ряд исследований по обострению высоковольтных импульсов в нелинейных передающих линиях с насыщенным ферритом был выполнен в 1990-х годах в группе ученых из Великобритании [12–16]. Как в эксперименте, так и в численном расчете за ударным фронтом наблюдались ВЧ колебания [15]. Однако глубина модуляции колебаний и их число были незначительными, так что говорить о возможности генерации радиоимпульсов не приходилось. Чтобы достичь заметной энергии в радиоимпульсе, возбуждаемом в ферритовой линии с подмагничиванием, по сравнению с энергией в импульсе накачки, Дж. Доланом и Н. Седдоном было предложено использовать высокочастотный иттрий-гранатовый (YIG) феррит [17, 18]. Соответствующие экспериментальные работы до сих пор имеют закрытый характер. Но как следует из патентов, длительность возбуждаемых радиоимпульсов не превышала нескольких наносекунд. В любом случае, разработанные источники имеют скорее демонстрационное, нежели практическое значение, поскольку цена на кольца из YIG феррита да-

же с миллиметровыми размерами оказывается чрезвычайно большой. Поскольку поток мощности в ферритовых линиях ограничен электрическим пробоем, применение линий с сечением в несколько миллиметров не позволяет рассчитывать на генерируемую ВЧ мощность большую, чем несколько десятков МВт.

Существенным шагом в развитии ферритовых линий с подмагничиванием и первой публикацией по данной тематике в открытой печати стала наша работа [A1], в которой была показана возможность возбуждения ВЧ колебаний с глубокой модуляцией в линии, частично заполненной NiZn ферритом. После этой работы нами был выполнен цикл работ, посвященных всестороннему экспериментальному исследованию этого эффекта и разработке на его основе источников электромагнитного излучения субгигаваттного уровня мощности, что составляет основу данной диссертации. Также эта публикация послужила толчком к проведению исследований описываемого эффекта во многих лабораториях в различных странах мира, включая Великобританию [19], Францию, США [20–26], Китай, Сингапур, Республику Корея [27], Украину [28] и Бразилию [29]. В англоязычной литературе за данным типом нелинейных линий закрепилось название «гиромагнитных», поскольку возбуждение высокочастотных колебаний тока происходит в них за счет возбуждения гиромагнитной прецессии вектора намагниченности насыщенного феррита. Таким образом, актуальность темы исследования в ее экспериментальной части связана прежде всего с изучением особенностей генерирования мощных наносекундных ВЧ импульсов в коаксиальных линиях с насыщенным ферритом и созданием на этой основе мощных источников электромагнитного излучения. Для задач генерирования мощных наносекундных импульсов излучения широкое распространение получили приборы релятивистской СВЧ электроники, в том числе релятивистские лампы обратной волны [30], многоволновые СВЧ-генераторы [31], магнетроны [32] и другие приборы с релятивистским электронным пучком [33]. Эти генераторы излучают квазимонохроматические сигналы с энергией в импульсе до величин ~ 100 Дж. Другое направление по генерированию мощных электромагнитных импульсов связано с излучением сверхширокополосных (СШП) сигналов при подаче на антенну монополярных и биполярных высоковольтных импульсов [34]. Энергия в импульсе излучения в таких источниках достигает ~ 1 Дж. Создание источников излучения на нелинейных линиях с насыщенным ферритом

наряду с некоторыми ограничениями, рассмотренными в данной диссертации, расширяет возможности известных источников мощных наносекундных импульсов излучения. Очевидными преимуществами источников мощных радиоимпульсов на основе нелинейных передающих линий с насыщенным ферритом по сравнению с устройствами сильноточной релятивистской электроники являются сочетание высокой генерируемой мощности с относительной компактностью в дециметровом диапазоне длин волн, а также отсутствие попутного рентгеновского излучения. По сравнению с источниками СШП излучения на основе биполярных импульсов, источники на нелинейных линиях с насыщенным ферритом имеют бóльшую плотность спектральной энергии на центральной частоте излучения. Возможность перестройки генерируемой частоты излучения и работы с высокой частотой повторения импульсов делает такие источники востребованными для задач изучения эффектов воздействия мощных электромагнитных импульсов на электронную аппаратуру, полупроводниковые приборы, а также в биологии и медицине. А задача по созданию многоканальных фазированных генераторов мощных СВЧ импульсов на основе линий с ферритом открывает возможности по достижению высоких плотностей мощности в генерируемом излучении, так как во многих случаях предельные мощности единичных СВЧ генераторов ограничены условиями по электрическому пробоему как в электродинамической системе, так и на выходе излучающей антенны.

Что касается теоретического рассмотрения процесса возбуждения мощных ВЧ колебаний в линии с насыщенным ферритом, то чаще всего соответствующая система уравнений Ландау-Лифшица и уравнений Максвелла анализируется численными методами [28, 35]. В рамках данной диссертации при поэтапном сокращении количества допущений модели проведено аналитическое рассмотрение, позволяющее сделать выводы о физике описываемых процессов. Необходимо отметить, что некоторые работы по теоретическому описанию возбуждения колебаний в гиромагнитных линиях с насыщенным ферритом уже были опубликованы как на заре исследований ударных электромагнитных волн [10], так и в недавнее время [36]. Тем не менее, целостного теоретического анализа до сих пор проведено не было. Поэтому соответствующее направление теоретического анализа, представленного в данной диссертации, представляется актуальным.

Цели и задачи диссертационной работы

Общей целью диссертационной работы являлось теоретическое и экс-

периментальное изучение условий для эффективной генерации мощных высокочастотных электромагнитных импульсов на основе нелинейных передающих линий с насыщенным ферритом для создания импульсно-периодических источников излучения. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Экспериментальное определение предельных энергетических параметров радиоимпульсов, которые могут быть получены с использованием эффекта генерации ВЧ колебаний в нелинейной линии с насыщенным ферритом.

2. Исследование возможностей перестройки возбуждаемых колебаний по частоте.

3. Построение теоретической модели, которая позволяет на качественном уровне объяснить наблюдаемые закономерности.

4. Определение условий, в которых феррит может быть использован при высокой частоте повторения импульсов без разрушения электрическим пробоем.

5. Исследование принципиальной возможности параллельного включения нескольких нелинейных линий с целью сфазированного сложения радиоимпульсов и повышения плотности мощности пропорционально квадрату числа нелинейных линий.

6. Исследование возможностей электронного управления направлением излучения за счет регулировки скорости волны в дополнительной линии задержки с ферритом.

7. Исследование возможностей использования ферритовых линий в качестве обострителей и регуляторов фазы мощных электронных релятивистских СВЧ генераторов, фаза колебаний в которых фиксируется коротким фронтом импульса напряжения.

Помимо перечисленных фундаментальных задач, в рамках диссертационной работы решались также и прикладные задачи, связанные с расчетом и проектированием компонентов и узлов, необходимых для создания макетов устройств с выводом излучения.

Научная новизна

Следующие научные результаты были впервые получены в ходе выполнения настоящей диссертационной работы:

1. Показано, что в однородной нелинейной линии с частичным заполнением насыщенным ферритом происходит эффективное возбуждение

ВЧ колебаний при распространении по ней монополярного высоковольтного импульса. Максимальная ВЧ мощность достигается для линии длиной около 1 м и с дальнейшим удлинением линии спадает. При мощности монополярного импульса 3 ГВт пиковая ВЧ мощность достигает 0.7 ГВт. Максимальная длительность цуга ВЧ колебаний также достигается на этой длине и составляет 3-5 нс.

2. Показано, что центральная частота возбуждаемых в гиромангнитной нелинейной линии колебаний может лежать в широких пределах (от 0.6 до 2.5 ГГц) при достижении в линии соответствующей величины азимутального магнитного поля. Было показано, что, изменяя ток подмагничивания (продольное магнитное поле), можно управлять центральной частотой в пределах 15%.

3. Построена аналитическая модель, позволяющая качественно объяснить зависимость частоты возбуждаемых колебаний от магнитных полей на основе уравнения гиромангнитной прецессии и телеграфных уравнений, а также классифицировать нелинейную линию с насыщенным ферритом как среду с кубической нелинейностью, по которой могут распространяться связанные электромагнитно-спиновые волны, при определенных допущениях описываемые модифицированным уравнением Кортевега-де-Вриза-Бюргерса.

4. Показано, что в линии под давлением 14 атм и напряженности электрического поля в масле 300 кВ/см и в феррите 100 кВ/см время жизни ферритов составляет не менее $3 \cdot 10^6$ импульсов. Достигнута частота следования генерируемых радиоимпульсов субгигаваттного уровня мощности 1000 Гц.

5. Показано, что фаза возбуждаемых колебаний жестко привязана к фронту высоковольтного импульса при достаточной стабильности источника тока для подмагничивания нелинейной линии. Реализованное стандартное отклонение задержки радиоимпульса между каналами составляет около 3 пс при полном разбросе 20 пс. Продемонстрировано четырехкратное (для двухканальной системы) и шестнадцатикратное (для четырехканальной системы) увеличение плотности мощности излучения многоканальных генераторов.

6. Показано, что регулировка тока подмагничивания в дополнительной линии задержки с ферритовым заполнением позволяет перемещать максимум диаграммы направленности излучения сначала с использовани-

ем двух-, а затем четырехканального генератора на нелинейных линиях.

7. Показано, что обострение высоковольтных импульсов и регулирование времени задержки в ферритовой линии позволяет создать двухканальные и четырехканальные электронные СВЧ генераторы с экстремально высокой интенсивностью электромагнитных полей с управляемой разностью фаз между каналами с пикосекундной стабильностью.

Теоретическая и практическая значимость

Исследования закономерностей преобразования энергии высоковольтного видеоимпульса в радиоимпульс в коаксиальной линии с насыщенным ферритом заложили основу для создания нового типа импульсно-периодических источников мощных радиоимпульсов. Экспериментально найдены оптимальные параметры нелинейных линий с ферритом, позволившие реализовать источники радиоимпульсов с эффективным потенциалом излучения несколько сотен киловольт и длительностью в несколько наносекунд на частоте от 0.6 до 2.5 ГГц с шириной спектра около 0.5 ГГц по уровню -10 дБ. Разработаны макеты импульсно-периодических источников наносекундных радиоимпульсов с линейной и эллиптической поляризацией излучения. Максимальный энергетический КПД преобразования высоковольтного импульса в излучение составил около 10%, а КПД преобразования по пиковой мощности достигал 28%. Проведенные исследования по созданию многоканальных СВЧ генераторов закладывают основы для создания фазированных антенных решеток на их основе.

Ряд источников радиоимпульсов, изготовленных на основе результатов диссертационной работы, был передан отечественным и зарубежным заказчикам из исследовательских центров Республики Корея, Франции, Китая и Сингапура. Также генерируемые наносекундные ВЧ импульсы были применены для исследований по воздействию на некоторые биологические объекты.

Методология и методы исследования

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования носят главным образом экспериментальный характер. Проведенные экспериментальные работы были связаны с измерением наносекундных высоковольтных импульсов, импульсов излучения и их последующей обработкой. Представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты получены с использованием известных диагностических методик, описанных в Приложении А к диссертации. Методика теоретического анализа включа-

ла в себя решение уравнений в частных производных, а также редуکتивный метод возмущений [37].

Положения, выносимые на защиту

1. В приближении стационарной волны система уравнений для главной ТЕМ-волны в коаксиальной линии с насыщенным ферритом без учета затухания сводится к уравнению Дуффинга для консервативного осциллятора с кубической нелинейностью для пропорционально связанных между собой азимутальных компонент намагниченности и магнитного поля. Решения этого уравнения имеют вид кноидальных волн, частоты которых возрастают с амплитудой высоковольтного импульса и спадают при увеличении поля подмагничивания. При этом максимальная амплитуда первого пика возбуждаемых затухающих колебаний не превышает $\sqrt{2}$ от амплитуды падающего импульса.

2. Эффективность возбуждения ВЧ колебаний в линии с ферритом имеет максимум в зависимости от поля подмагничивания. В слабом магнитном поле эффективность снижается, так как перестают выполняться условия для насыщения феррита и возбуждения гиромагнитной прецессии. В сильном магнитном поле эффективность снижается из-за роста потерь в феррите.

3. При распространении высоковольтного импульса по нелинейной линии с насыщенным ферритом сначала происходит обострение фронта импульса примерно до половины периода возбуждаемых колебаний, и лишь затем происходит нарастание колебаний с насыщением на длине до 1 м. При этом пиковая мощность на выходе нелинейной линии достигает величины, вдвое превышающей мощность падающего импульса, а длительность цуга возбуждаемых колебаний не превышает 3 ÷ 5 нс из-за потерь в феррите. Наиболее эффективное возбуждение ВЧ колебаний достигается в диапазоне коэффициентов заполнения зазора коаксиальной линии ферритом 0.4 ÷ 0.6.

4. Нелинейная передающая линия с насыщенным ферритом при питании высоковольтным импульсом с наносекундным фронтом представляет собой источник мощных ВЧ колебаний в дециметровом диапазоне длин волн с частотой, перестраиваемой за счет изменения амплитуды высоковольтного импульса и поля подмагничивания. Ширина полосы возбуждаемых колебаний по уровню -10 дБ составляет около 0.5 ГГц. Диапазон перестройки частоты током подмагничивания составляет около 15% по уровню

–3 дБ. Зависимость центральной частоты колебаний от внешнего продольного поля является спадающей. Оптимальные поля подмагничивания для NiZn ферритов серии ВНП лежат в диапазоне $30 \div 50$ кА/м. Диапазону азимутального магнитного поля $10 \div 100$ кА/м, создаваемому в феррите высоковольтным импульсом, соответствует диапазон центральной частоты генерации от 0.6 ГГц до 2.5 ГГц. Зависимость центральной частоты колебаний от азимутального поля является нарастающей.

5. На основе возбуждения мощных ВЧ колебаний в нелинейной линии с насыщенным ферритом созданы источники наносекундных радиоимпульсов с эффективным потенциалом излучения в несколько сотен киловольт при максимальном энергетическом КПД до 10% и частоте повторений импульсов до 1000 Гц. Ресурс работы ферритов в таких источниках составляет не менее $3 \cdot 10^6$ импульсов при напряженности электрического поля в феррите до 100 кВ/см. В источнике мощных радиоимпульсов на основе гиромагнитной нелинейной линии с использованием сверхширокополосной комбинированной излучающей антенны достигнут коэффициент перекрытия диапазона частот излучения около двух, что сопровождается изменением эффективного потенциала излучения примерно в три раза.

6. Управление сдвигом фазы между каналами в многоканальных источниках излучения на основе гиромагнитных нелинейных линий, а также на основе релятивистских ламп обратной волны достигается за счет изменения длительности фронта падающего высоковольтного импульса и времени его задержки при изменении поля подмагничивания в линии с ферритом. В этих источниках достигнуто синфазное сложение, управление диаграммой направленности излучения и наращивание плотности потока мощности излучения в главном направлении диаграммы пропорционально квадрату числа каналов при стандартном отклонении фазы колебаний между каналами на уровне единиц процентов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Описанные в диссертации научные результаты докладывались на различных конференциях и симпозиумах: 35-й международной конференции IEEE по науке о плазме — ICOPS 2008 (Карлсруэ, Германия), 16-й Саратовской зимней школе-семинаре по СВЧ-электронике и радиофизике 2009, международных конференциях IEEE по мощной импульсной энергетике — RPS (Чикаго, США, 2011 г.; Сан-Франциско, США, 2013 г.), международных симпозиумах по сильноточной электронике — ISHCE (2010 г., 2012 г.,

2014 г., 2016 г., Томск, Россия), 14-й международной конференции IEEE по импульсным модуляторам и высокому напряжению — IPMNVС 2014 (Санта Фе, США, 2014 г.), Евро-Азиатских конференциях по мощной импульсной энергетике — EAPPC (Лиссабон, Португалия, 2016 г.; Чанша, Китай, 2018 г.), 2-м всемирном конгрессе по электропорации (Норфолк, США, 2017 г.).

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 34 печатных работах, из них 23 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК [А1–А23], и 11 статей в сборниках трудов конференций [А24–А34].

Личный вклад автора.

Основная часть результатов, представленных в диссертации, получена автором лично (Главы 1–3). В экспериментах по генерации радиоимпульсов с перестраиваемым спектром излучения (Глава 4, п. 4.4) была применена комбинированная СШП антенна, разработанная в лаборатории высокочастотной электроники ИСЭ СО РАН (к.ф.-м.н. Ю. А. Андреев). Экспериментальная часть исследований процессов генерации радиоимпульсов в четырехканальном источнике на нелинейных линиях выполнена автором диссертации совместно с коллективом лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН (Глава 5, п. 5.2). В экспериментах с релятивистскими СВЧ генераторами (Глава 5, п. 5.3), проведенных с многоканальными макетами источников излучения в ИСЭ СО РАН (частота 10 ГГц) и в ИЭФ УрО РАН (частота 37 ГГц), участие автора относится главным образом к линиям с ферритом.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения по методике измерений и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 220 страниц, включая 163 рисунка. Список литературы включает 137 наименований на 16 страницах.

Основное 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.

Первая глава посвящена теоретическому анализу возбуждения ВЧ колебаний ударным фронтом высоковольтного импульса, при его распространении по передающей коаксиальной линии с насыщенным ферритом. Анализ проводится в приближении, в котором волна намагниченности взаимодействует только с главной ТЕМ-волной коаксиальной линии, пренебрегая возбуждением высших типов волн. Анализируемая согласованная система уравнений состоит из уравнения Ландау-Лифшица и телеграфных уравнений. Анализ построен на последовательном включении в рассмотрение дисперсии, затухания и нестационарности решения. В приближении, не учитывающем дисперсию, рассмотрено формирование ударного фронта импульса и дан вывод формулы для длины линии с насыщенным ферритом, на которой образуется ударный фронт, хорошо согласующейся с экспериментальными данными [А21]. Анализ дисперсионной зависимости для ТЕМ-волны, Рис. 1 а), показывает, что вдоль нелинейной линии с насыщенным ферритом могут распространяться так называемые оптические волны, ОВ, магнитостатические волны, МСВ, и возмущения, описываемые в длинноволновом приближении, ДВ. Частота колебаний, возбуждаемых за фронтом высоковольтного импульса, находится в длинноволновой области и соответствует синхронизму между ударным фронтом и фазовой скоростью ТЕМ-волны на данной частоте, Рис. 1 б). При этом формирование протяженного цуга ВЧ колебаний происходит за счет того, что

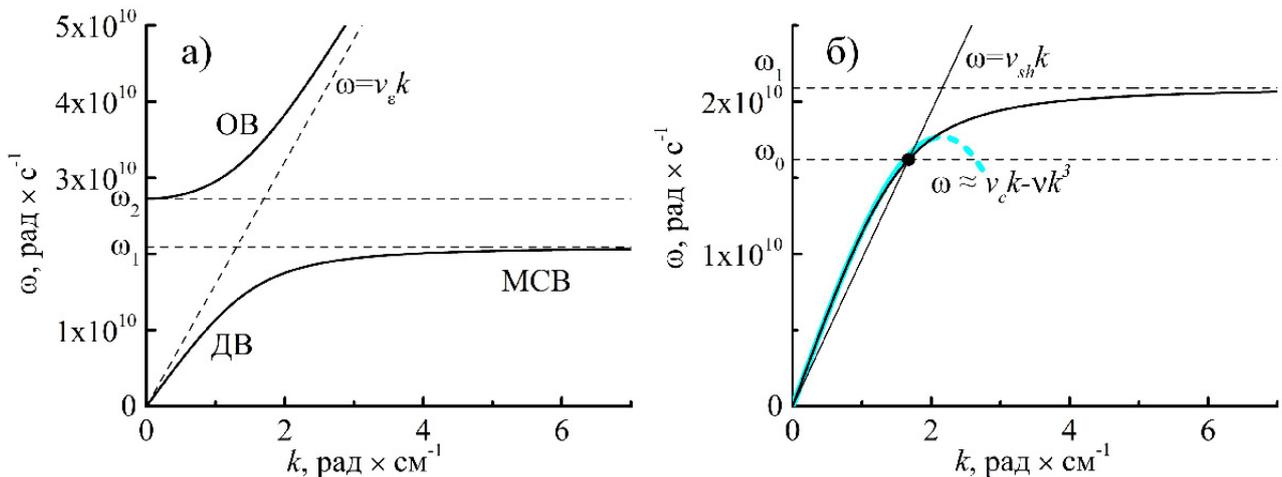


Рис. 1. а) Характерный вид дисперсионной зависимости ТЕМ-волны в коаксиальной линии с насыщенным ферритом; б) длинноволновая ветвь дисперсионной зависимости: частота синхронизма ω_0 фазовой скорости с ударной волной (также приведена аппроксимация дисперсионной зависимости в кубическом приближении).

групповая скорость возбуждаемых колебаний существенно ниже фазовой. Приводится формула для частоты синхронизма, которая совпадает с частотой решения в виде стационарной волны в линейном приближении для пропорционально связанных между собой азимутальных компонент намагниченности и магнитного поля.

Показывается, что для случая стационарной волны без учета диссипации исходная система уравнений при полном заполнении ферритом коаксиального зазора линии сводится к уравнению Дуффинга для азимутальных компонент намагниченности и магнитного поля. Соответствующие колебания консервативного осциллятора с кубической нелинейностью происходят внутри потенциальной ямы, глубина которой возрастает при увеличении нелинейного характера колебаний, Рис. 2 а). ВЧ колебаниям в линии с ферритом, наблюдаемым в экспериментах, соответствуют решения уравнения Дуффинга в виде кноидальных волн, частоты которых возрастают с амплитудой высоковольтного импульса и спадают при увеличении поля подмагничивания, Рис. 2 б). При этом максимальная амплитуда первого пика возбуждаемых затухающих колебаний не превышает $\sqrt{2}$ от амплитуды падающего импульса (максимальная глубина потенциальной ямы, Рис. 2 а), так как при этом кноидальные волны вырождаются в решение в виде уединенной волны. На Рис. 2 б) приведены зависимости частоты линейных колебаний ω от приложенных магнитных полей, в то время как частота нелинейных колебаний отличается только понижающим фактором,

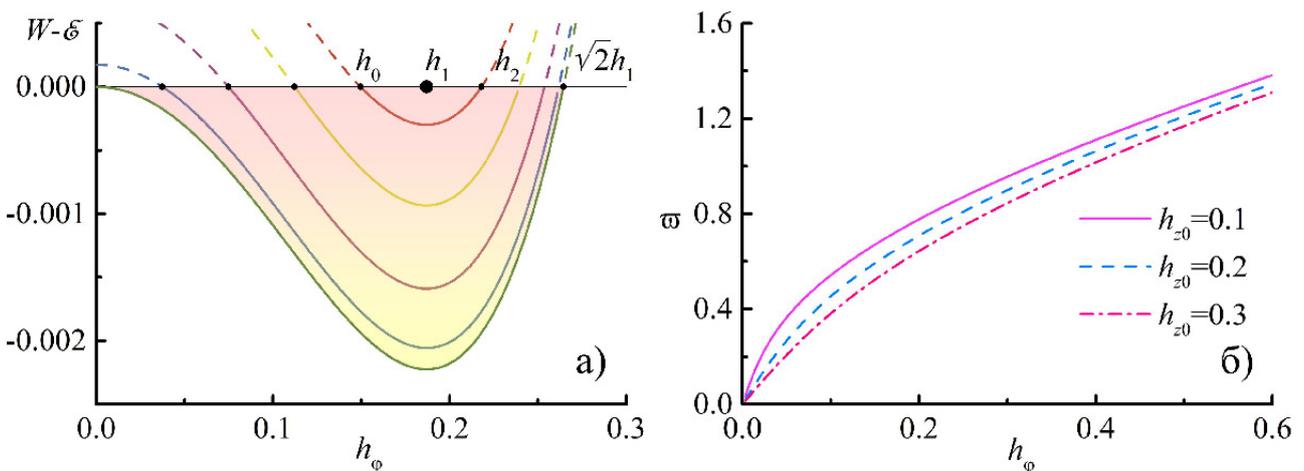


Рис. 2. а) Потенциальная яма для различных амплитуд колебаний азимутального магнитного поля (закрашенная область соответствует действительным решениям); б) частота линейных колебаний в зависимости от азимутального и продольного магнитных полей.

зависящим от амплитуды колебаний, который для наблюдаемых в экспериментах колебаний составляет 0.5–0.8.

Учет затухания в феррите приводит к исчезновению «запрещенной зоны» на дисперсионной зависимости, Рис. 1 а). Оценка пространственного декремента затухания на частоте синхронизма с ударным фронтом при феноменологическом параметре затухания $\alpha \approx 0.05$ приводит к выводу о том, что осцилляции за ударным фронтом спадают в e раз всего за несколько периодов. В приближении стационарной волны с учетом затухания численное решение уравнения Ландау-Лифшица для безразмерного вектора намагниченности приведено на Рис. 3. Полученное решение для азимутальной компоненты намагниченности, пропорциональной величине напряжения в коаксиальной линии с ферритом, проанализировано в зависимости от приложенного продольного поля подмагничивания. Как следует из Рис. 4 а), при увеличении продольного поля подмагничивания эффективность возбуждения колебаний уменьшается, в то время как уменьшение продольного поля не приводит к заметному изменению эффективности. В то же время при малых магнитных полях насыщение феррита не происходит, что является единственной причиной снижения эффективности возбуждения ВЧ колебаний при уменьшении продольного магнитного поля.

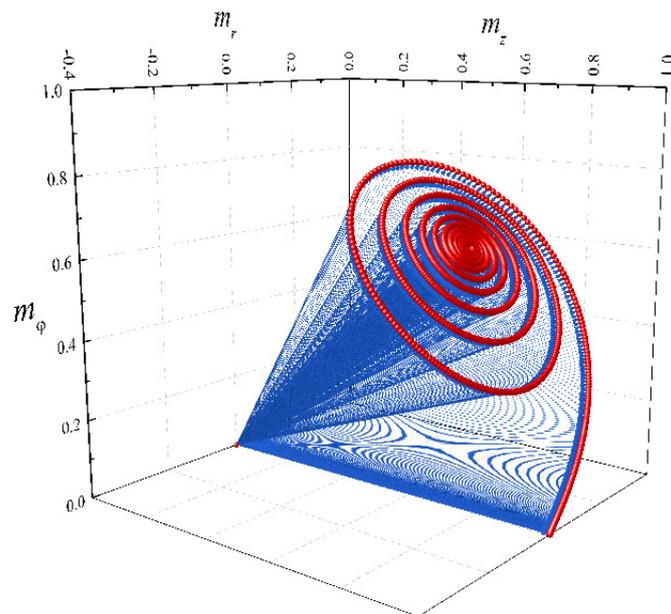


Рис. 3. Траектория вращения вектора намагниченности для стационарной волны с учетом затухания в коаксиальной линии с насыщенным ферритом (параметры, характерные для экспериментов).

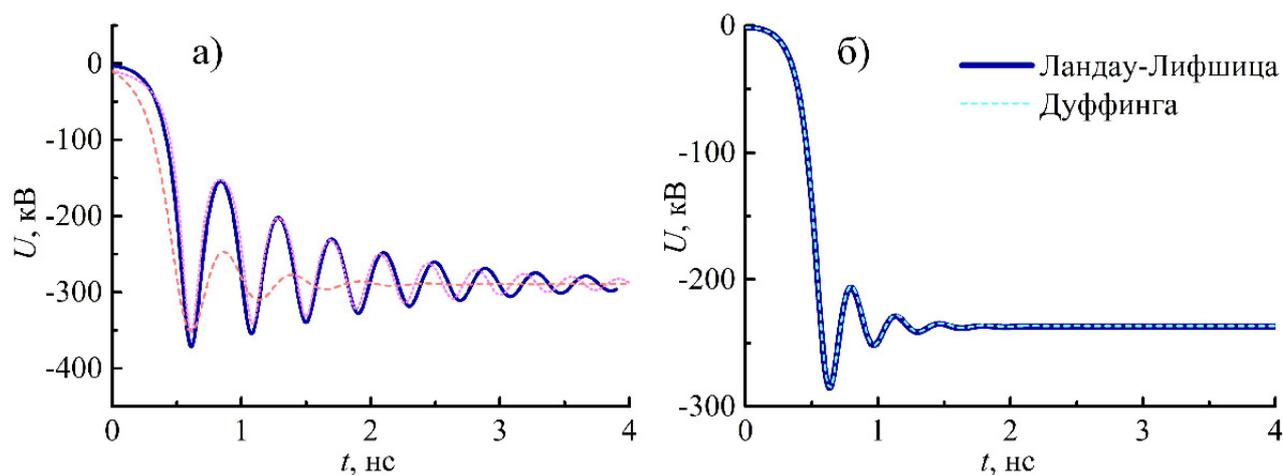


Рис. 4. а) Расчетные осциллограммы напряжения для стационарной волны для нелинейной линии при оптимальном экспериментальном продольном поле (сплошная линия), с десятикратным увеличением продольного поля (штрихованная линия) и с десятикратным уменьшением (пунктирная линия); б) Расчетные осциллограммы в сильном поле.

В сильном продольном магнитном поле член уравнения Ландау-Лифшица, отвечающий за затухание, перестает быть малой поправкой и существенно влияет на динамику формирования осцилляций, приводя к более быстрому их затуханию. При этом в приближении стационарной волны система уравнений сводится к уравнению Дуффинга с затуханием, численное интегрирование которого дает тот же результат, что и интегрирование уравнения Ландау-Лифшица, Рис. 4 б).

Нестационарная динамика рассмотрена в приближении сильного продольного магнитного поля при полном заполнении ферритом коаксиального зазора линии. На основе метода редутивных возмущений [37] показано, что без учета затуханий исходная система уравнений сводится к модифицированному уравнению Кортевега-де Вриза, а при учете затухания — к модифицированному уравнению Кортевега-де Вриза-Бюргерса, которое встречается в задачах о формировании ударных волн [38, 39].

Результаты первой главы опубликованы в работах [А3, А14, А21, А33, А34].

Вторая глава посвящена экспериментальному определению параметров нелинейной линии с насыщенным ферритом, обеспечивающих эффективное возбуждение ВЧ колебаний. Большая часть экспериментов была выполнена с генераторами высоковольтных импульсов, которые относятся к семейству СИНУС [40]. Измерения высоковольтных импульсов на вы-

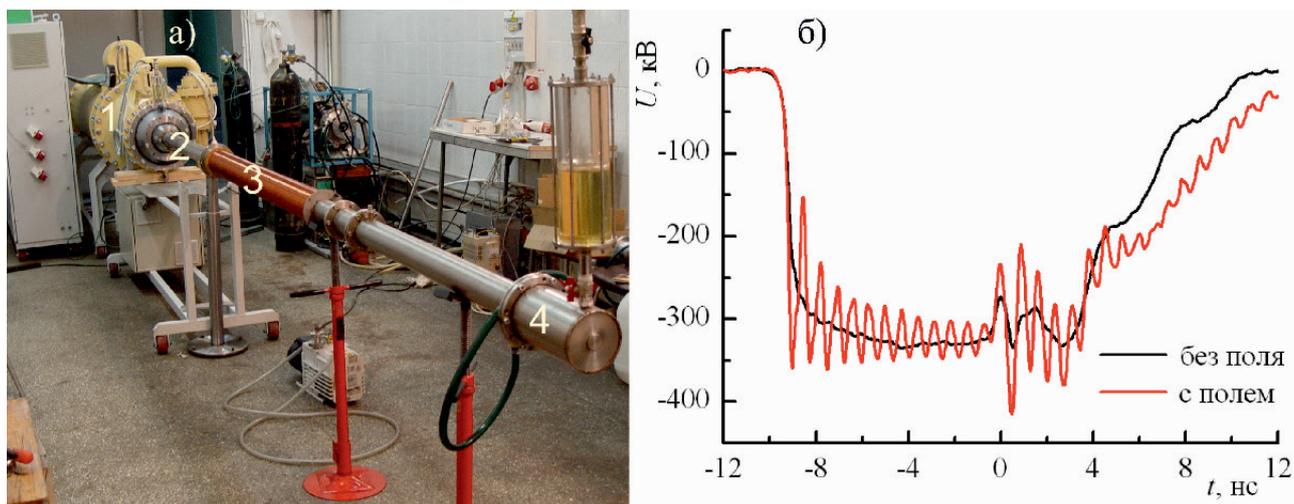


Рис. 5. а) Экспериментальная установка: 1 — генератор СИНУС-500; 2 — ферритовая линия без подмагничивания; 3 — ферритовая линия с подмагничиванием; 4 — резистивная низкочастотная нагрузка; б) осциллограммы напряжения на выходе ферритовой линии (повторный всплеск колебаний — отражение от нагрузки).

ходе нелинейной линии производились в начале передающей линии, длина которой обеспечивала развязку с отражениями от резистивной нагрузки. Одна из экспериментальных установок приведена на Рис. 5 а). Здесь фронт падающего импульса дополнительно обострялся в линии с ферритом без подмагничивания. Характерные осциллограммы на выходе нелинейной линии при оптимальном поле подмагничивания и без него приведены на Рис. 5 б). Исследовалась зависимость амплитуды первого колебания, Рис. 6 а), от длины ферритового заполнения в двух геометриях нелинейных линий. Полученная зависимость для нелинейной линии в первой геометрии приведена на Рис. 6 б) и соответствует линейному росту с длиной. При дальнейшем росте длины колебания выходят на насыщение, Рис. 7. Показано, что на начальном участке нелинейной линии с насыщенным ферритом происходит формирование фронта, сравнимого с половиной периода возбуждаемых колебаний, после чего происходит эффективное нарастание колебаний, Рис. 6 б). При переходе от изоляции нелинейной линии трансформаторным маслом к изоляции касторовым маслом было обнаружено, что сильная дисперсия диэлектрической проницаемости касторового масла не позволяет сформироваться в нелинейной линии ударному фронту, в результате чего возбуждения колебаний не наблюдалось.

Экспериментальное исследование эффективности возбуждения ВЧ колебаний было проведено для десяти различных геометрий нелинейных ли-

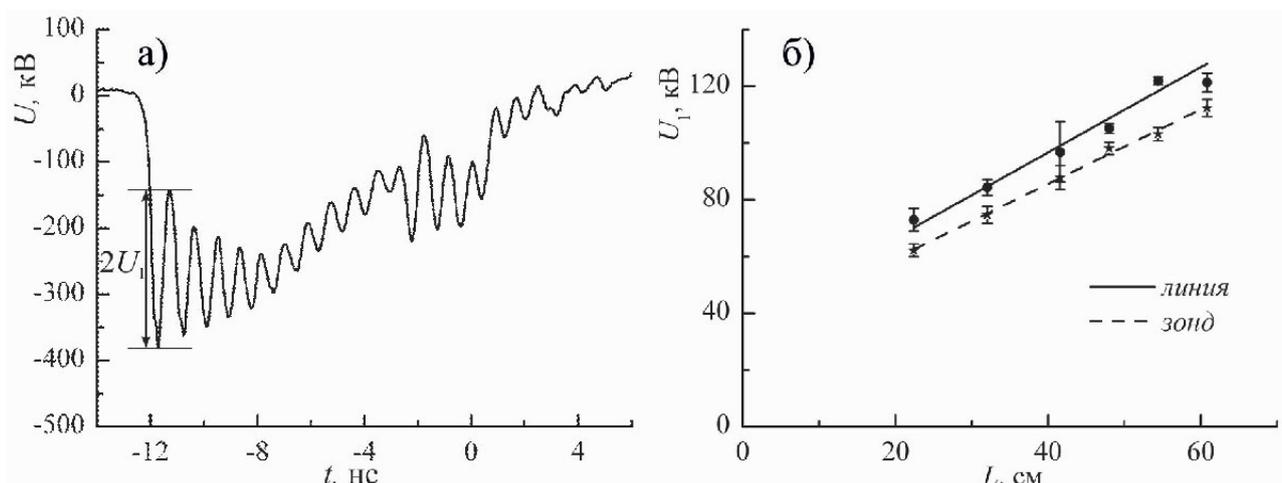


Рис. 6. а) Определение амплитуды первого колебания; б) рост амплитуды первого колебания с длиной ферритового заполнения нелинейной линии в Геометрии 2 (ферритовые кольца с диаметрами 45×28 мм, генератор — СИНУС-200).

ний. Показано, что существует область оптимальных значений заполнения коаксиального зазора нелинейной линии ферритом по площади χ , примерно от 0.4 до 0.6, когда эффективность возбуждения колебаний максимальна, Рис. 8 а). При $\chi > 0.6$ спад эффективности на основе представленного в первой главе анализа объяснить не удастся, в то время как при $\chi < 0.2$ разница между фазовой и групповой скоростью возбуждаемых колебаний резко сокращается, что может быть одной из причин уменьшения эффективности в этом диапазоне χ .

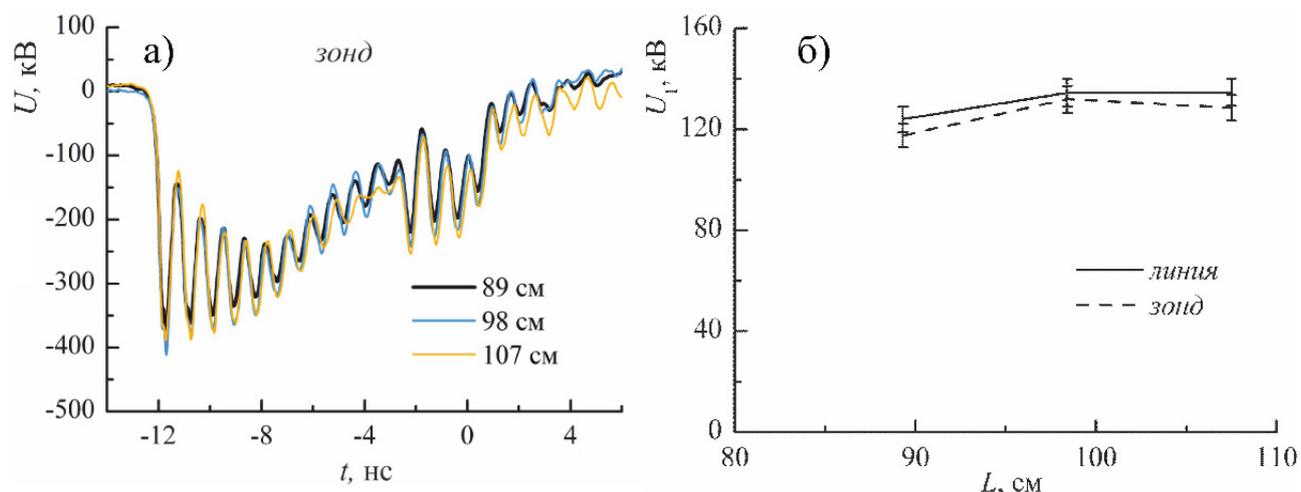


Рис. 7. а) Насыщение ВЧ-импульса нелинейной линии в Геометрии 1 (ферритовые кольца с диаметрами 65×40 мм) и б) насыщение амплитуды первого колебания с длиной ферритового заполнения (курсивом указаны датчики напряжения).

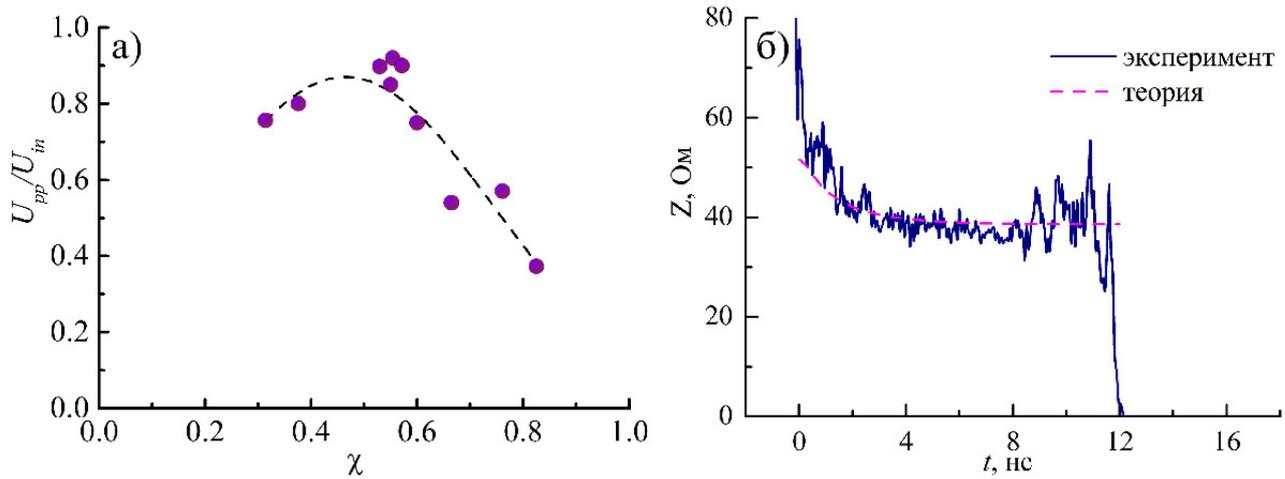


Рис. 8. а) Зависимость относительной амплитуды первой осцилляции $U_{pp} = 2U_1$ от коэффициента заполнения для различных геометрий нелинейных линий; б) осциллограммы динамического импеданса на входе нелинейной линии в Геометрии 1 для амплитуды падающего импульса 290 кВ.

На основе метода динамической рефлектометрии исследован входной импеданс нелинейной линии. Полученные осциллограммы входного импеданса хорошо согласуются с теоретическими зависимостями, Рис. 8 б). Исследованы различные варианты высоковольтной изоляции линии с ферритом. Показано, что при использовании SF_6 изоляции эффективность в исследованной геометрии снижается. Показано, что использование изоляции вакуумным маслом снижает диэлектрические потери примерно в три раза по сравнению с трансформаторным маслом в исследованном диапазоне частот.

Приводятся результаты исследования с ответвлением генерируемой ВЧ мощности в системе связанных коаксиальных линий. Показано согласие расчетных и экспериментальных данных при низком КПД, что связано с многократным перетеканием ВЧ энергии из одной линии в другую.

Результаты второй главы опубликованы в работах [А1, А2, А4, А8, А19, А20].

В третьей главе приводятся экспериментальные результаты исследования частотных характеристик возбуждаемых в линиях с насыщенным ферритом колебаний. Спектральные характеристики сигнала, получаемого на выходе линии с ферритом, анализировались на основе преобразования Фурье этого сигнала в интервале первых восьми наносекунд, Рис. 9. Для высокочастотных колебаний, возбуждаемых в ферритовой линии, парци-

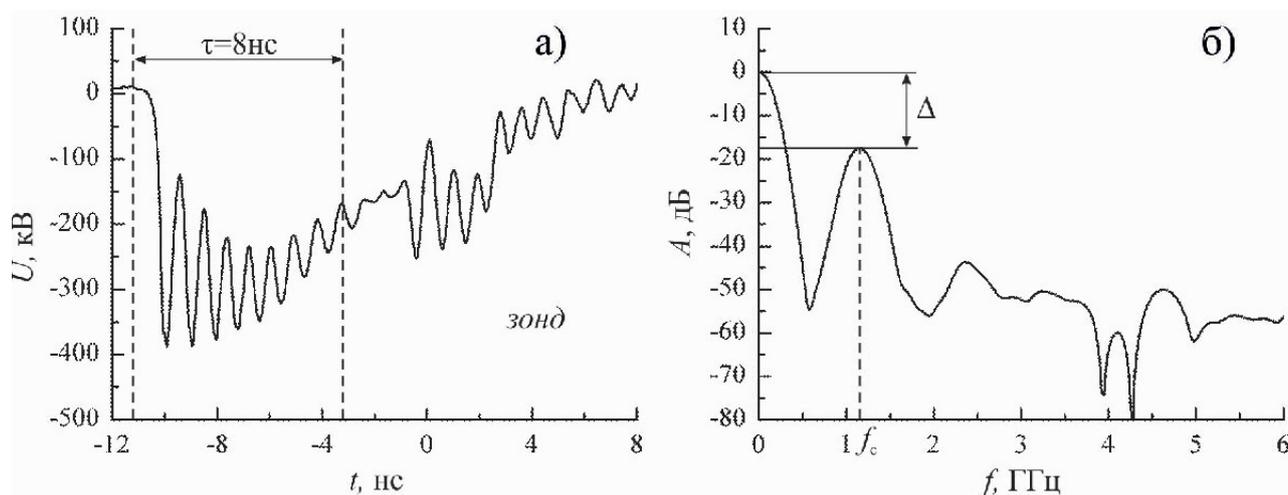


Рис. 9. а) Осциллограмма напряжения в Геометрии 1 и б) ее спектральное разложение.

альная ширина спектра [41] обычно лежит в диапазоне $30\% \lesssim \eta \lesssim 40\%$, а ширина полосы по уровню -10 дБ $\delta f \sim 0.5$ ГГц. Таким образом, излучающая система, основанная на использовании ферритовой линии, будет представлять собой, в соответствии с введенными определениями, источник широкополосного либо СШП излучения [42].

Исследована зависимость центральной частоты спектра колебаний f_c от длины ферритового заполнения. Наблюдаемое снижение частоты колебаний с длиной и, соответственно, с ростом амплитуды колебаний вполне соответствует выводам теоретического рассмотрения, представленного в первой главе, когда переход от линейного к нелинейному режиму сопровождается ростом периода колебаний. Исследована зависимость частоты колебаний и разности между первой и нулевой гармоникой Δ от поля подмагничивания, Рис. 10 а). Как следует из приведенных данных, диапазон полей подмагничивания, при которых возбуждение ВЧ колебаний происходит наиболее эффективно, составляет $30\text{--}50$ кА/м. Показана возможность перестройки частоты колебаний полем подмагничивания, которое составляло $\sim 15\%$ по уровню -3 дБ. При этом зависимость частоты от поля подмагничивания является спадающей. Исследована зависимость частоты от амплитуды падающего импульса, которая является возрастающей. Показано существование нижнего порога по частоте, Рис. 11, на уровне 400 МГц, поскольку дальнейшее увеличение периода делает его сравнимым с временем релаксации гироманитной прецессии в феррите, что, по-видимому, и является причиной отсутствия колебаний при более низких напряжениях. Исследована частота генерации ВЧ колебаний в нелинейных линиях для

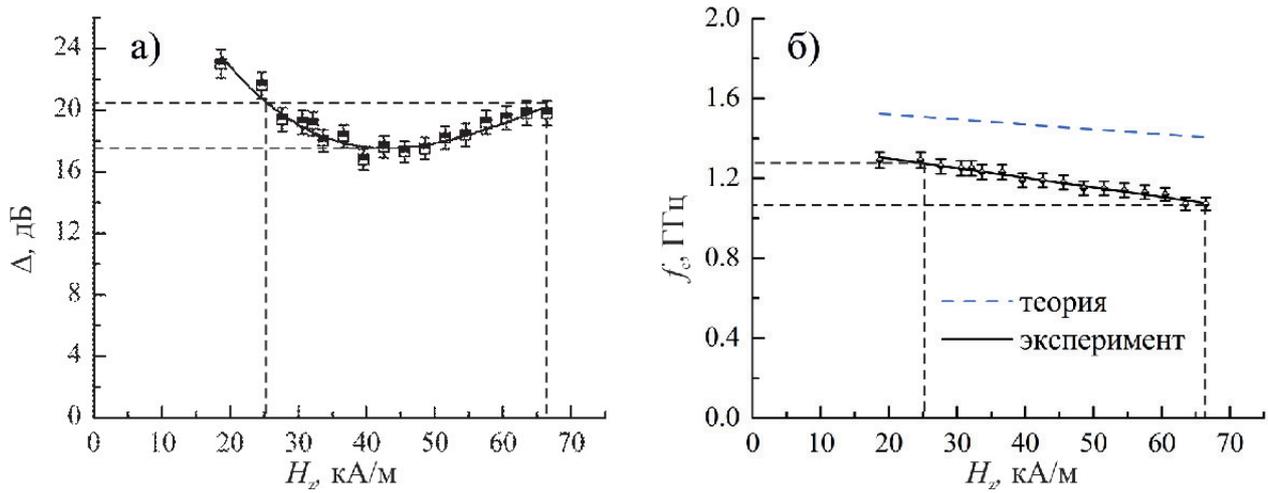


Рис. 10. Зависимость параметров спектра от продольного поля в Геометрии 1 (пунктиром обозначена перестройка частоты по уровню -3 дБ).

десяти различных геометрий. Полученные данные обобщены и приведены на Рис. 12 в зависимости от усредненной по сечению феррита величины азимутального магнитного поля. Как следует из приведенных данных, теоретическая зависимость, рассчитанная для некоторого усредненного значения коэффициента поперечного заполнения ферритом, дает значения, близкие к экспериментальным только для частот, близких к 1 ГГц и ниже. Для более высоких частот наблюдается отклонение от теоретической кривой, а также неоднозначный характер зависимости. Анализ критических частот высших типов волн показал, что для всех исследованных геометрий нелинейных линий критическая частоты моды TE_{11} коаксиала оказывается

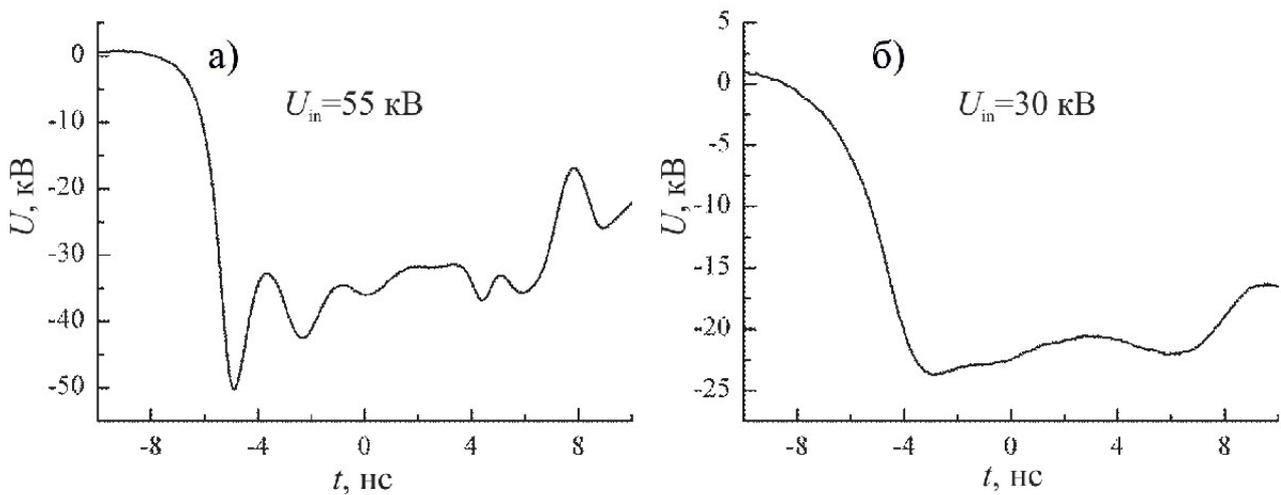


Рис. 11. Порог по амплитуде падающего импульса для возбуждения колебаний в нелинейной линии в Геометрии 1, соответствующий минимальной наблюдаемой частоте.

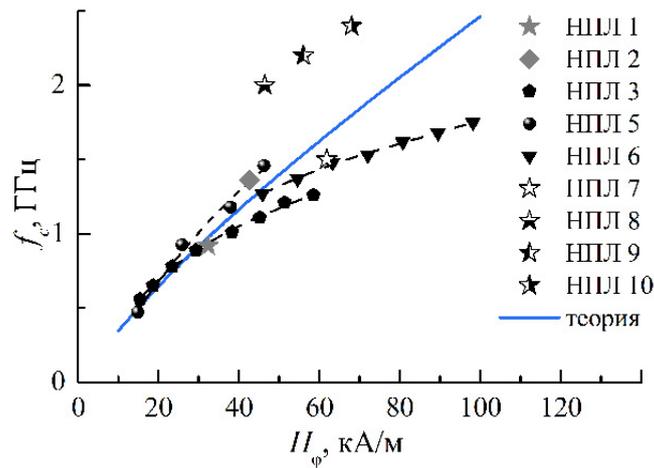


Рис. 12. Зависимость центральной частоты от азимутального поля при оптимальном поле подмагничивания.

ниже возбуждаемой в данных линиях частоты колебаний. Это указывает на вероятность участия моды TE_{11} в динамике возбуждения колебаний. Критические частоты остальных высших типов оказываются выше частоты возбуждаемых в нелинейных линиях колебаний.

Исследованы различные марки ферритов с точки зрения влияния их параметров на частоту колебаний. Использование разных марок феррита серии ВМП с различными статическими характеристиками приводит к возбуждению колебаний с близкими параметрами. Корреляций между параметрами колебаний и характеристиками феррита данной серии не выявлено. Представляется, что паспортные статические свойства феррита, такие как начальная относительная магнитная проницаемость, коэрцитивная сила по индукции и индукция насыщения, имеют второстепенное значение для процесса возбуждения высокочастотных колебаний. Кроме этого, обнаружен неконтролируемый разброс в параметрах колебаний при использовании разных партий феррита одной марки. Это говорит о необходимости контроля высокочастотных характеристик феррита для получения колебаний с вполне предсказуемыми параметрами на выходе ферритовой линии.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [А1, А4, А14, А19, А20, А24, А34].

В четвертой главе представлены результаты по созданию генераторов мощных наносекундных радиоимпульсов на основе возбуждения ВЧ колебаний в линии с ферритом с различными вариантами вывода излучения. Приводятся результаты испытаний линии с ферритом на ресурс. Для

исключения развития электрического пробоя масляная изоляция линии с ферритом находилась под давлением азота около 14 атм. При этом величина напряженности электрического поля в зазоре между центральным проводником коаксиала и ферритом достигала около 300 кВ/см, а в феррите — около 100 кВ/см. Показана работоспособность нелинейной линии при этих условиях с ресурсом не менее $3 \cdot 10^6$ импульсов без деградации ВЧ параметров. Представлены результаты по разработке и испытанию полосовых фильтров, в которых низкочастотная составляющая импульса поглощается в резистивной нагрузке, а ВЧ импульс передается на антенну, Рис. 13, исключая паразитные колебания высокого напряжения в генераторе. Приводятся данные для трех разработанных полосовых фильтров, рассчитанных на центральные частоты около 1.0, 1.5 и 2.0 ГГц. Представлены результаты по испытанию генератора мощных ВЧ импульсов без вывода излучения для изучения эффектов воздействия на биологические объекты. В этом генераторе ВЧ импульс формируется в виде TE_{10} -моды прямоугольного волновода, нагруженного на согласованную волноводную СВЧ нагрузку. Показана возможность изменения амплитуды ВЧ импульса от ~40 кВ/см до сотен В/см.

Представлены результаты испытаний генератора радиоимпульсов с рупорной антенной на основе генератора высоковольтных импульсов СИ-НУС-200, Рис. 14 а). В этом источнике ВЧ импульс после преобразователя мод поступал в виде TE_{11} -моды круглого волновода на вход рупорной антенны, формирующей распределение излучения по Гауссу с линейной поляризацией. Как видно из осциллограммы импульса излучения, Рис. 14 б),

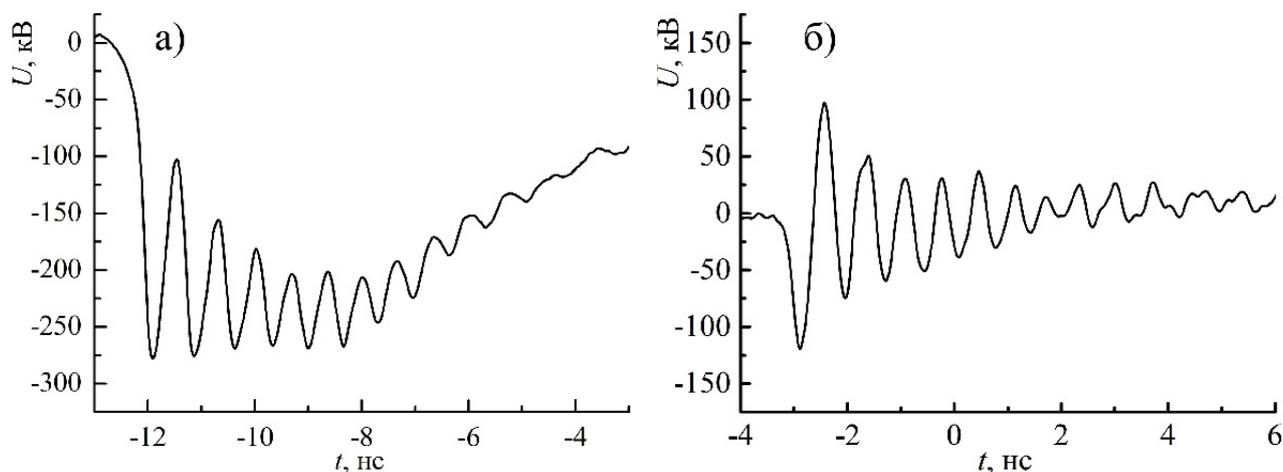


Рис. 13. Типичные осциллограммы а) на входе и б) на выходе полосового фильтра.

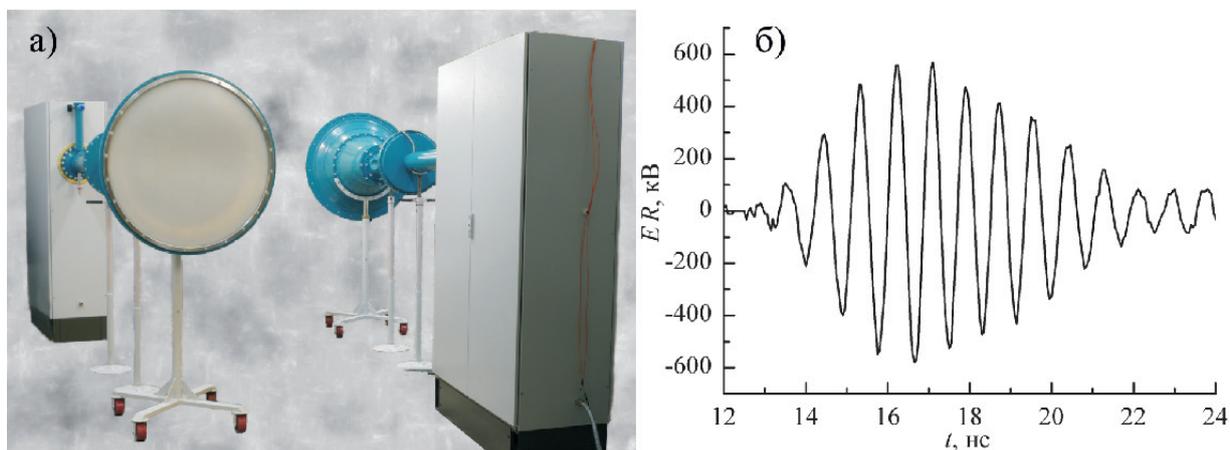


Рис. 14. а) Внешний вид генератора радиоимпульсов; б) осциллограмма импульса излучения.

эффективный потенциал излучения $E_p R$ достигает 600 кВ. При этом энергия в радиоимпульсе составляет ~ 0.6 Дж. При запасенной в формирующей линии генератора СИНУС-200 энергии 20 Дж, энергетическая эффективность преобразования в излучение составит $\sim 3\%$. Ширина спектра сигнала по уровню -10 дБ составляет ~ 0.4 ГГц при $f_c \approx 1.2$ ГГц.

Представлены результаты испытаний источника радиоимпульсов с линейной поляризацией с использованием комбинированной СШП антенны, разработанной в лаборатории высокочастотной электроники ИСЭ СО РАН. Расчетная и измеренная зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) комбинированной СШП антенны приведены на Рис. 15 а). Широкая полоса антенны позволила сформировать импульс

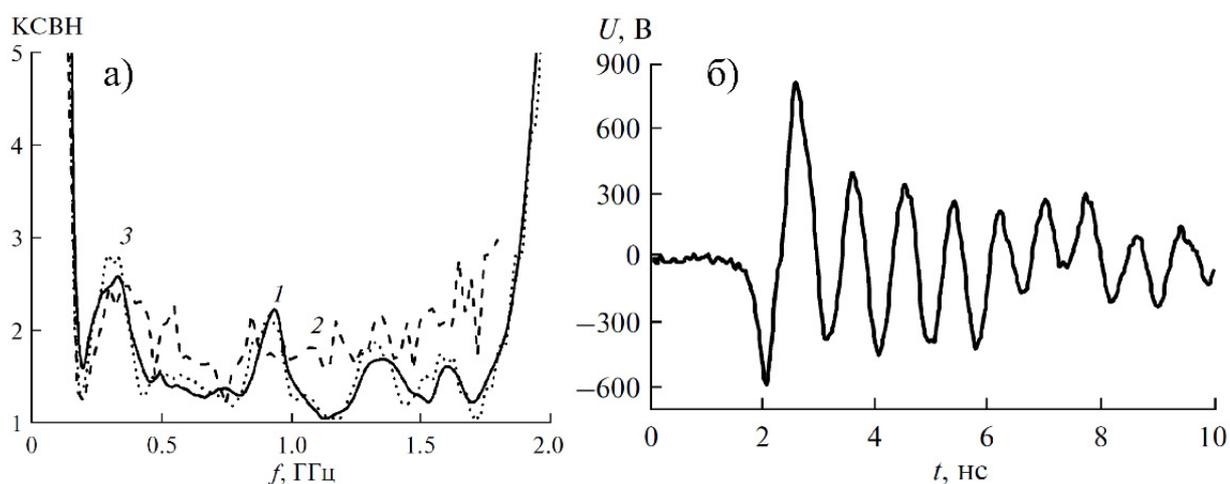


Рис. 15. а) Зависимость КСВН комбинированной антенны от частоты: 1 — эксперимент, 2 — расчет, 3 — эксперимент (антенна в диэлектрическом контейнере); б) осциллограмма импульса излучения.

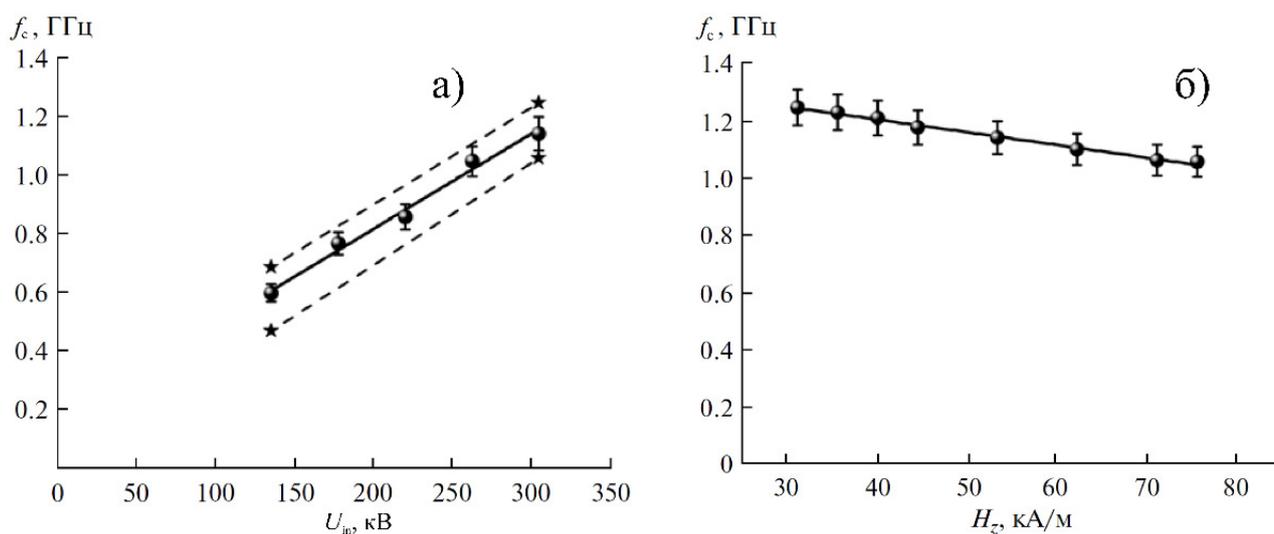


Рис. 16. Зависимость центральной частоты излучения а) от входного напряжения нелинейной линии и б) от поля подмагничивания при $U_{in} \approx 300$ кВ.

излучения с максимальной амплитудой первого колебания, Рис. 15 б). При этом изменение амплитуды падающего высоковольтного импульса и поля подмагничивания позволило осуществить перестройку частоты излучения в пределах от 0.5 до 1.3 ГГц, Рис. 16. Эффективный потенциал излучения при этом изменялся от 95 до 310 кВ соответственно, а энергетическая эффективность преобразования в излучение достигала 4.5%. При использовании конической спиральной антенны, Рис. 17 а), было получено излучение с поляризацией, близкой к круговой (Рис. 17 б), на частоте около 1.4 ГГц. Эффективный потенциал излучения составлял 400 кВ при энергетической эффективности около 10%, которая достигалась за счет срав-

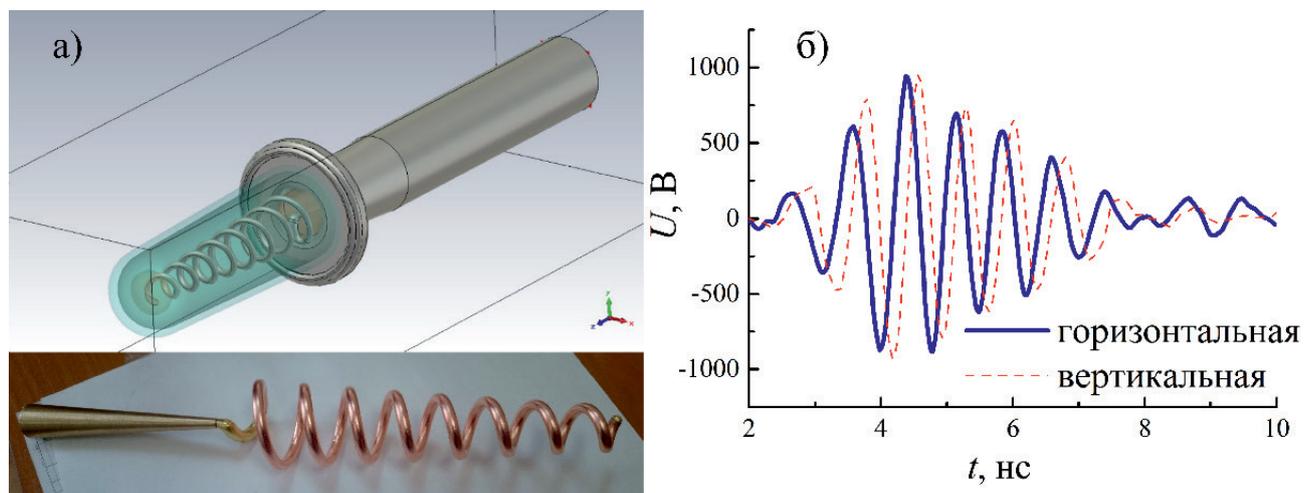


Рис. 17. а) Модель спиральной антенны и внешний вид спирали с коническим согласующим переходом; б) осциллограммы импульса излучения для различных поляризаций.

нимой длительности падающего высоковольтного импульса (около 5 нс) и излученного радиоимпульса (около 4 нс).

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [А8, А9, А14, А19, А20, А22, А27, А29, А32].

В пятой главе представлены исследования по созданию многоканальных фазированных генераторов мощных СВЧ импульсов на основе линий с ферритом. Разработан подход по когерентному сложению мощных СВЧ импульсов от нескольких СВЧ генераторов при помощи контроля фазы в линиях задержки с ферритом за счет изменения поля подмагничивания. Показано, что наиболее эффективный для реализации управления фазой диапазон полей подмагничивания составляет от единиц до 20-40 кА/м. Приведены результаты испытаний двухканального источника радиоимпульсов на основе линий с насыщенным ферритом, Рис. 18 а-б) (ГВИ — генератор высоковольтных импульсов, НПЛ — нелинейная передающая линия). Показано двукратное увеличение амплитуды излученного сигнала в максимуме диаграммы направленности, Рис. 18 в-г), по отношению к случаю, когда генерация происходит только в одном канале, Рис. 18 д-е). Стандартное отклонение фазы между каналами составляло около 20 пс, или 2% от периода возбуждаемых колебаний при частоте около 1 ГГц. Эта величина определяется главным образом стабильностью тока подмагничивания. В экспериментах с четырехканальным источником радиоимпульсов на основе линий с насыщенным ферритом, проведенных совместно с ИЭФ

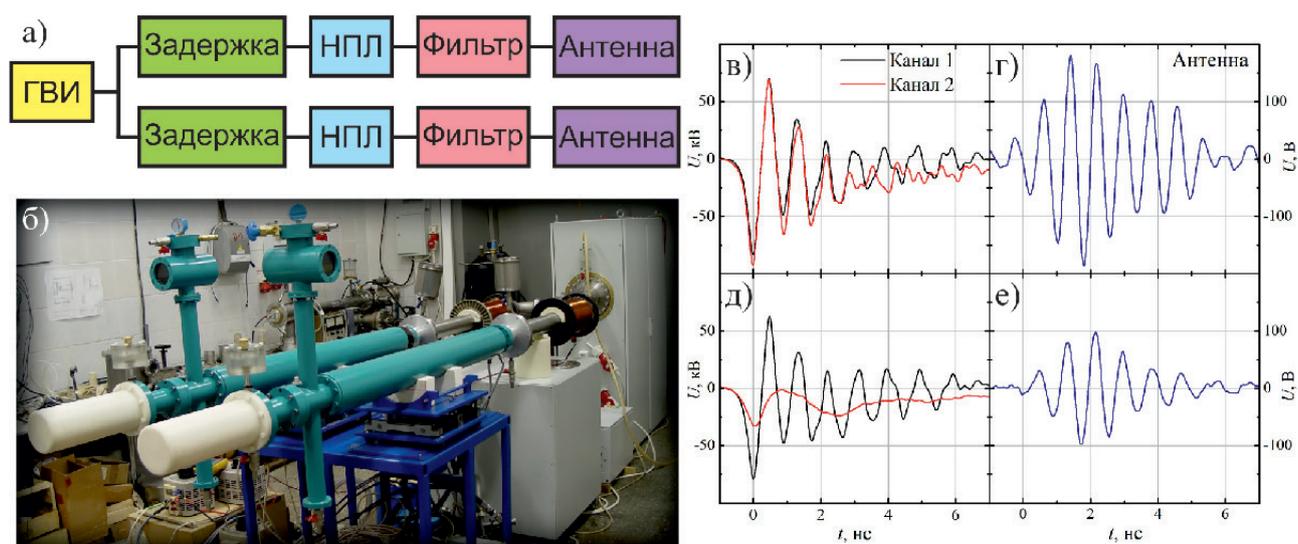


Рис. 18. а) Блок-схема и б) внешний вид двухканального источника радиоимпульсов; (в-г) синфазное излучение; (д-е) поле подмагничивания во втором канале отсутствует.

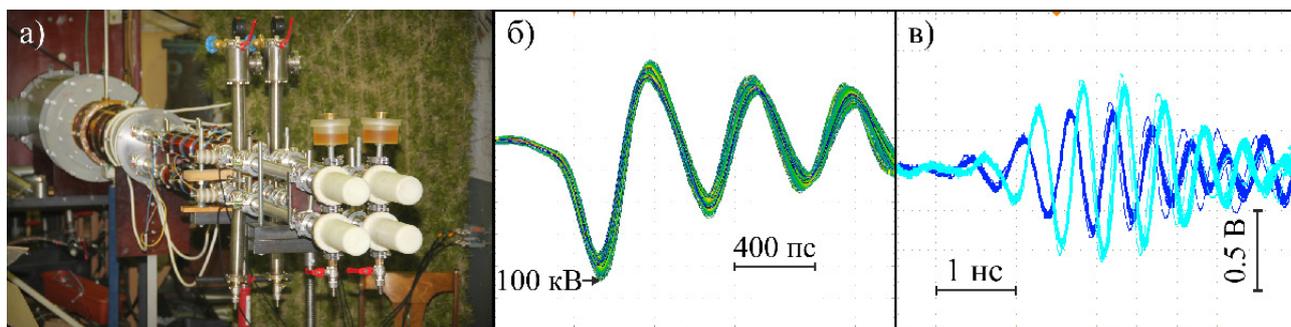


Рис. 19. а) Внешний вид четырехканального источника радиоимпульсов; б) синхронные ВЧ импульсы, падающие на спиральные антенны от четырех каналов; в) осциллограммы излученных импульсов в вертикальной (меньшая амплитуда) и в горизонтальной (большая амплитуда) поляризациях при синфазной генерации в четырех каналах. Расстояние до приемной антенны 4 м, наложение 1000 импульсов с частотой следования 1000 Гц.

УрО РАН, Рис. 19 а), также продемонстрировано синфазное сложение излученных сигналов, которое привело к 16-кратному увеличению плотности мощности в максимуме диаграммы направленности излучения. Показана возможность изменения направления максимума диаграммы на 17° от случая синфазной генерации в четырех каналах. Получено стандартное отклонение фазы между каналами около 3 пс при частоте генерации около 2 ГГц. Продемонстрирована стабильная работа источника на частоте следования импульсов 1000 Гц, Рис. 19 б-в). Приведены результаты исследования температурного дрейфа фазы в линиях с насыщенным ферритом. Показано, что эффективная магнитная проницаемость линии с ферритом является спадающей функцией температуры.

Приведены результаты экспериментов по применению линий с ферритом для создания многоканальных генераторов СВЧ импульсов на основе релятивистских ламп обратной волны. Продемонстрирована синфазная генерация в двухканальном макете на релятивистских лампах обратной волны на частоте 10 ГГц в режиме сверхизлучения, Рис. 20 а), и на частоте 37 ГГц в квазистационарном режиме (несколько сотен периодов, ИЭФ УрО РАН). Показано, что управление фазой в релятивистской ЛОВ при изменении поля подмагничивания происходит за счет изменения длительности фронта высоковольтного импульса, падающего на вакуумный диод, и времени его задержки, Рис. 20 б). Показана возможность в импульсно-периодическом режиме стабильно управлять разностью фаз между каналами, обеспечивая генерацию в фазе и в противофазе, что приводит к смещению

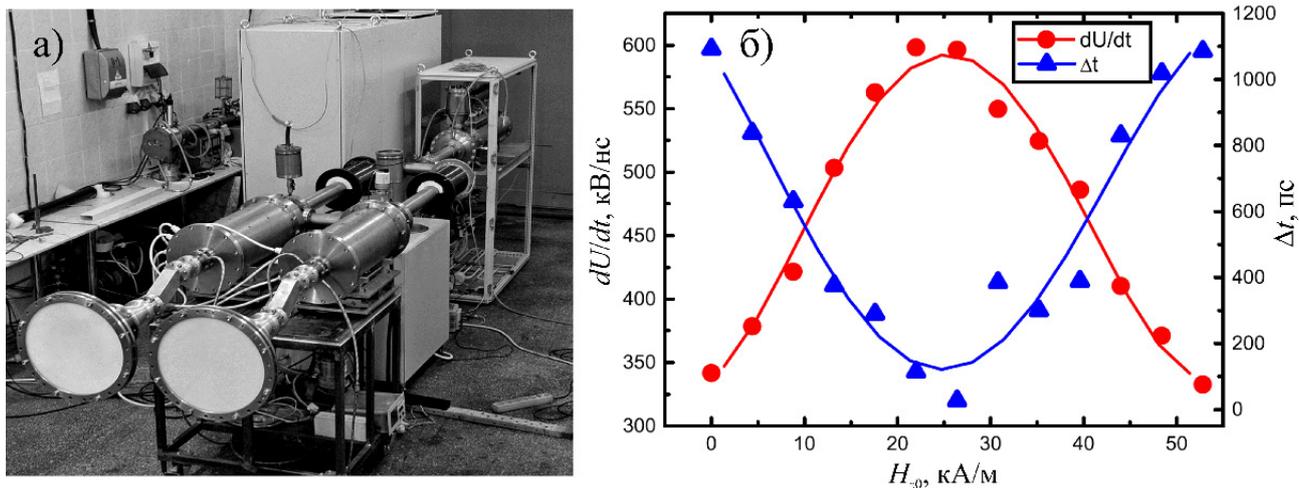


Рис. 20. а) Внешний вид двухканального источника СВЧ импульсов; б) максимальная производная напряжения на вакуумном диоде (кружки), задержка в появлении СВЧ импульса (треугольники) в зависимости от поля подмагничивания линии с ферритом.

соответствующей интерференционной картины на газоразрядной панели. Приведена оценка стабильности фазы, выполненная при помощи видеорегистрации свечения газоразрядной панели. Обработка данных для двухканального генератора с частотой 10 ГГц показала, что сдвиг фазы на один период равный 100 пс происходил при изменении поля подмагничивания на 15%, а при фиксированном значении полей подмагничивания стандартное отклонений разности фаз между каналами было на уровне 1%. В четырехканальном источнике с синфазной генерацией в четырех СИ ЛОВ на частоте 38 ГГц, созданном в ИЭФ УрО РАН, достигнуто стандартное отклонение фазы между каналами при синфазной генерации на уровне около 2%. Продемонстрировано 16-кратное увеличение плотности мощности в дальней зоне излучения относительно одноканальной генерации, Рис. 21.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [А5-А7, А10-А14, А16-А18, А20, А23, А25, А26, А31].

В Заключение подводятся краткие итоги диссертационной работы, обсуждаются перспективы источников мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения на основе линий с ферритом. Автор выражает благодарность людям, участвовавшим в проведении работ, представленных в диссертации, а также оказавшим помощь и поддержку на всем пути автора к представлению диссертационной работы.

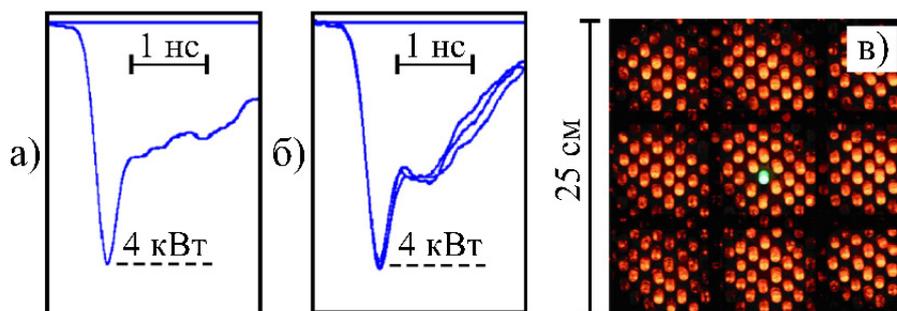


Рис. 21. а) Импульс сверхизлучения на СВЧ детекторе от одиночного СВЧ генератора; б) три осциллограммы с СВЧ детектора при синфазной генерации в четырех каналах при ослаблении в измерительном канале в 16 раз; в) интерференционная картина излучения на газоразрядной панели, расположенной на расстоянии 1.5 м от антенной решетки.

Список публикаций по теме диссертации с участием автора

- 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. 2009. Т. 35. № 13. С. 81–87.
- A2. 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.
- A3. Романченко И. В., Ростов В. В. Энергетические уровни колебаний в нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 7. С. 111–114.
- A4. 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.
- A5. Ельчанинов А. А., Климов А. И., Ковальчук О. Б., Месяц Г. А., Пегель И. В., Романченко И. В., Ростов В. В., Шарыпов К. А., Яландин М. И. Когерентное сложение мощности наносекундных релятивистских СВЧ-генераторов // ЖТФ. 2011. Т. 80. № 1. С. 125–130.
- A6. Rostov V. V., Elchaninov A. A., Romanchenko I. V., Yalandin M. I. A

coherent two-channel source of Cherenkov superradiance pulses // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 100. Pp. 224102(1–4).

- A7. Яландин М. И., Шунайлов С. А., Ульмаскулов М. Р., Шарыпов К. А., Шпак В. Г., Ростов В. В., Романченко И. В., Ельчанинов А. А., Климов А. И. Синфазные наносекундные релятивистские СВЧ-генераторы обратной волны диапазона 37 ГГц без электродинамической связи // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38. № 20. С. 8–14.
- A8. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Gubanov V. P., Stepchenko A. S., Gunin A. V., and Kurkan I. K. Repetitive Sub-gigawatt rf source based on gyromagnetic nonlinear transmission line // *Review of Sci. Instr.* 2012. Vol. 83. Pp. 074705(1–6).
- A9. Андреев Ю. А., Кошелев В. И., Романченко И. В., Ростов В. В., Сухущин К. Н. Генерация и излучение мощных сверхширокополосных импульсов с управляемым спектром // *Радиотехника и электроника*. 2013. Т. 58. № 4. С. 337–347.
- A10. Ельчанинов А. А., Климов А. И., Романченко И. В., Ростов В. В., Педос М. С., Рукин С. Н., Шарыпов К. А., Шпак В. Г., Шунайлов С. А., Ульмаскулов М. Р., Яландин М. И., Романченко И. В., Ельчанинов А. А., Климов А. И. Двухканальный релятивистский генератор встречной волны диапазона 8 мм с управляемой разностью фаз и мощностью 230 MW в канале // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. № 20. С. 49–56.
- A11. Sharypov K. A., El'chaninov A. A., Mesyats G. A., Pedos M. S., Romanchenko I. V., Rostov V. V., Rukin S. N., Shpak V. G., Shunailov S. A., Ul'masculov M. R., and Yalandin M. I. Coherent summation of Ka-band microwave beams produced by superradiance backward wave oscillators // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103. Pp. 134103(1–4).
- A12. Rostov V. V., El'chaninov A. A., Klimov A. I., Konev V. Yu., Romanchenko I. V., Sharypov K. A., Shunailov S. A., Ul'maskulov M. R., and Yalandin M. I. Phase Control in Parallel Channels of Shock-Excited Microwave Nanosecond Oscillators // *Plasma Sci. IEEE Trans. on*. 2013. Vol. 41. no. 10. Pp. 2735–2741.
- A13. Ростов В. В., Ельчанинов А. А., Романченко И. В., Шунайлов С. А., Ульмаскулов М. Р., Шарыпов К. А., Шпак В. Г., Рукин С. Н., Яландин М. И. Двухканальный генератор излучения 8-миллиметрового диапазона длин волн с импульсами субгигаваттного уровня // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2013. Т. 56. № 8-9. С. 525–543.

- A14. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Gunin A. V., and Konev V. Yu. High power microwave beam steering based on gyromagnetic nonlinear transmission lines // *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 117. Pp. 214907(1–5).
- A15. Ulmaskulov M. R., Pedos M. S., Rukin S. N., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Yalandin M. I., Romanchenko I. V., and Rostov V. V. High repetition rate multi-channel source of high-power rf-modulated pulses // *Review of Sci. Instr.* 2015. Vol. 86. Pp. 074702(1–6).
- A16. Ginzburg N. S., Cross A. W., Golovanov A. A., Mesyats G. A., Pedos M. S., Phelps A. D. R., Romanchenko I. V., Rostov V. V., Rukin S. N., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Ulmaskulov M. R., Yalandin M. I., and Zotova I. V. Generation of electromagnetic fields of extremely high intensity by coherent summation of Cherenkov superradiance pulses // *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 115. Pp. 114802(1–5).
- A17. Ginzburg N. S., Cross A. W., Golovanov A. A., Phelps A. D. R., Romanchenko I. V., Rostov V. V., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Ulmaskulov M. R., Yalandin M. I., and Zotova I. V. Coherent summation of emission from relativistic Cherenkov sources as a way of production of extremely high-intensity microwave pulses // *Plasma Sci. IEEE Trans. on*. 2016. Vol. 44. no. 4. Pp. 377–385.
- A18. Яландин М. И., Шарыпов К. А., Педос М. С., Романченко И. В., Ростов В. В., Рукин С. Н., Ульмаскулов М. Р., Шпак В. Г., Шунайлов С. А. Многоканальный генератор 8-миллиметрового диапазона длин волн на релятивистских лампах обратной волны со сдвинутыми частотами // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2015. Т. 59. № 8-9. С. 698–708.
- A19. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Gunin A. V., and Konev V. Yu. Gyromagnetic RF source for interdisciplinary research // *Review of Sci. Instr.* 2017. Vol. 88. Pp. 024703(1–5).
- A20. Romanchenko I.V., Ul'maskulov M.R., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Shpak V.G., Yalandin M.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Konev V. Yu., and Rostov V.V. Four channel high power rf source with beam steering based on gyromagnetic nonlinear transmission lines // *Review of Sci. Instr.* 2017. Vol. 88. Pp. 054703(1–6).
- A21. Mesyats G. A., Pedos M. S., Rukin S. N., Rostov V. V., Romanchenko I. V., Sadykova A. G., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Ul'masculov M. R., Yalandin M. I. Formation of 1.4 MeV runaway electron

flows in air using a solid-state generator with 10 MV/ns voltage rise rate // *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 112. Pp. 163501(1–5).

- A22. Жаркова Л. П., Романченко И. В., Большаков М. А., Ростов В. В. Влияние наносекундных ВЧ-импульсов на мембраны митохондрий // *Известия ВУЗов. Физика*. 2017. Т. 60. № 8. С. 46–49.
- A23. Rostov V. V., Romanchenko I. V., Gunin A. V., Pedos M. S., Rukin S. N., Sharypov K. A., Shunailov S. A., Ul'masculov M. R., and Yalandin M. I. Review of experiments on microwave beam steering in arrays of high-power oscillators by the control of voltage rise time // *Plasma Sci. IEEE Trans. on*. 2018. Vol. 46. no. 10. Pp. 3640–3647.
- A24. Romanchenko I. V., Rostov V. V. Frequency of high Power RF generation in nonlinear transmission lines with saturated ferrite // *Proc. of 16th International Symposium on High Current Electronics*. Tomsk, Russia. 2010. Pp. 521–524.
- A25. Rostov V. V., El'chaninov A. A., Romanchenko I. V., Yalandin M. I., and Mesyats G. A. Amplitude and phase control of superradiation pulses by the magnetic bias of saturated Ferrite // *Proc. Of 18 Int. IEEE Conf. Pulsed Power Plasma Science*. Chicago, USA. 2011. Pp. 647–652.
- A26. Romanchenko I. V. , Rostov V. V., Rukin S. N., Shunailov S. A., Sharypov K. A., Shpak V. G., Ul'masculov M. R., Yalandin M. I., and Pedos M. S. Advances in coherent power summation of independent Ka-band HPM oscillators. // *Proc. Of 18 Int. IEEE Pulsed Power Conf. San Fransisco, USA*. 2013. Pp. 1–6.
- A27. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Klimov A. I., Kurkan I. K., Gunin A. V., Koshelev V. I., Sukhushin K. N., Andreev Yu. A., and Konev V. Yu. Effective irradiation on high-power RF pulses from gyromagnetic nonlinear transmission lines // *Proc. Of 18 Int. IEEE Pulsed Power Conf. San Fransisco, USA*. 2013. Pp. 1–5.
- A28. Romanchenko I. V., Konev V. Yu., Bolshakov M. A., Zharkova L. P., Gunin A. V. and Rostov V. V. Gyromagnetic RF source for interdisciplinary applications and its approbation on isolated liver mitochondria // *Proc. Of 6th Euro-Asian Pulsed Power Conf. Lisbon, Portugal*. 2016 Pp. 1–3.
- A29. Zharkova L., Romanchenko I., Bolshakov M., and Rostov V. Mitochondrial respiration inhibition after exposure to UWB pulses as a possible mechanism of antitumor action // *Journal of Physics: Conf. Series*. Vol. 830. 2017. Pp. 012010(1–4).

- A30. Romanchenko I. V., Pripitnev P. V., Rostov V. V. RF pulse formation dynamics in gyromagnetic nonlinear transmission lines // *Journal of Physics: Conf. Series*. Vol. 830. 2017. Pp. 012034(1–4).
- A31. Rostov V. V., Romanchenko I. V., Gunin A. V., Ul'maskulov M. R., Rukin S. N., Shunailov S. A., Sharypov K. A., and Yalandin M. I. Electronic steering of radiation beam by phase control in the arrays of uncoupled nonlinear transmission lines and Cherenkov-type HPM oscillators // *Proc. Of 18 Int. IEEE Pulsed Power Conf. Brighton, UK. 2013*. Pp. 1–6.
- A32. Zharkova L. P. , Romanchenko I. V., Buldakov M. A., Pripitnev P. V., Bolshakov M. A., Rostov V. V. Mitochondrial membrane permeability after nanosecond electromagnetic pulsed exposure // *Proc. 20th Int. Symp. on High-Current Electronics. Tomsk, Russia. 2018*. Pp. 158–161.
- A33. Sadykova A. G., Pedos M. S., Rukin S. N., Rostov V. V., Romanchenko I. V., Sadykov A. F., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Ul'maskulov, and Yalandin M. I. Formation of 1.4 MeV runaway electron flows in air // *Proc. 20th Int. Symp. on High-Current Electronics. Tomsk, Russia. 2018*. Pp. 204–208.
- A34. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Ul'maskulov M. R., Sharypov K. A., Shunailov S. A., and Yalandin M. I. Nonlinear transmission lines in pulsed power and applications // *Proc. Of 7th Euro-Asian Pulsed Power Conf. Changsha, China. 2018*. Pp. 381–384.

Цитированная литература

1. Гапонов А. В., Островский Л. А., Фрейдман Г. И. Ударные электромагнитные волны (обзор) // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1967. Т. 10. С. 1376–1413.
2. Гапонов А. В., Фрейдман Г. И. Об ударных электромагнитных волнах в ферритах // *ЖЭТФ*. 1959. Т. 36. С. 957–958.
3. 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.
4. Белянцев А. М., Гапонов А. В., Фрейдман Г. И. О структуре фронта

- ударных электромагнитных волн в линиях передачи с нелинейными параметрами // ЖТФ. 1965. Т. 35. С. 677–689.
5. Островский Л. А. О взаимодействии слабых сигналов с электромагнитными ударными волнами // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2. С. 833–837.
 6. Гапонов А. В., Фрейдман Г. И. К теории ударных электромагнитных волн в нелинейных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3. С. 79–88.
 7. Landauer R. Shock waves in nonlinear transmission lines and their effect on parametric amplification // IBM J. Res. Develop. 1960. Vol. 4. Pp. 391–401.
 8. Хохлов Р. В. К теории ударных радиоволн в нелинейных линиях // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. С. 917–925.
 9. Катаев И. Г. Ударные электромагнитные волны. М. : Советское Радио, 1963. С. 152.
 10. Фрейдман Г. И. Ударные электромагнитные волны в полосковом волноводе, заполненном ферритом // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3. С. 276–284.
 11. Белянцев А. М., Гапонов А. В., Дауме Э. Я., Фрейдман Г. И. Экспериментальное исследование распространения электромагнитных волн конечной амплитуды в волноводах, заполненных ферритом // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. С. 1699–1710.
 12. Benson T. M., Pouladian-Kari R., Shapland A. J. Novel operation of ferrite loaded coaxial lines for pulse sharpening applications // Electronics Letters. 1991. Vol. 27. Pp. 861–863.
 13. Dolan J. E., Bolton H. R., Shapland A. J. Development of 60ps rise-time ferrite-loaded coaxial line // Electronics Letters. 1997. Vol. 33. Pp. 2049–2050.
 14. Brooker C., Altieri N., Eastwood G. et al. 90kV 1800A 85ps rise time electromagnetic shock line for UWB applications // Electronics Letters. 1999. Vol. 35. Pp. 2210–2212.
 15. Dolan J. E. Simulation of shock waves in ferrite-loaded coaxial transmission lines with axial bias // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. Pp. 1826–1831.
 16. Dolan J. E., Bolton H. R. Shock front development in ferrite-loaded coaxial lines with axial bias // IEE Proc.-Si. Meas. Technol. 2000. Vol. 147.

Pp. 237–242.

17. Seddon N., Dolan J. E. Radio frequency and microwave generator // Int. Publication Number WO 2007/141576 A1. 2007.
18. Seddon N., Dolan J. E. Radio frequency and microwave signals // U.S. Patent N 7 498 978 B2. 2009.
19. Chadwick S. J. F., Seddon N., Rukin S. A novel solid-state HPM source based on a gyromagnetic NLTL and SOS-based pulse generator // Proceedings of the IEEE Pulsed Power Conference. Chicago, IL. USA. 2011. Pp. 178–181.
20. Bragg J.-W. B., Dickens J., Neuber A. Investigation into the temperature dependence of ferrimagnetic nonlinear transmission lines // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40. Pp. 2210–2212.
21. Bragg J. B., Dickens J. C., Neuber A. A. Ferrimagnetic nonlinear transmission lines as high-power microwave sources // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41. Pp. 232–237.
22. Bragg J.-W., III W. Sullivan, Mauch D. et al. All solid-state high power microwave source with high repetition frequency // Rev. Sci. Instrum. 2013. Vol. 84. P. 054703.
23. Bragg J.-W., Dickens J., Neuber A. Material selection considerations for coaxial, ferrimagnetic-based nonlinear transmission lines // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. P. 064904.
24. Reale D., Bragg J.-W., Gonsalves N. et al. Magneto-electronics // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. P. 054706.
25. Johnson J. M., Reale D. V., Cravey W. H. et al. Material selection of a ferrimagnetic loaded coaxial delay line for phasing gyromagnetic nonlinear transmission lines // Rev. Sci. Instrum. 2015. Vol. 86. P. 084702.
26. Johnson J. M., Reale D. V., Krile J. T. et al. Characteristics of a four element gyromagnetic nonlinear transmission line array high power microwave source // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. P. 054704.
27. Ahn J.-W., Karelin S. Y., Kwon H.-O. et al. Exciting high frequency oscillations in a coaxial transmission line with a magnetized ferrite // Journal of Magnetism. 2015. Vol. 20, no. 4. Pp. 460–465.
28. Karelin S. Yu. Fdtd analysis of nonlinear magnetized ferrites: Simulation of oscillation forming in coaxial line with ferrite // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, no. 10. Pp. 873–882.
29. Rangel E. G. L., Rossi J. O., Barroso J. J. et al. Practical constraints

- on nonlinear transmission lines for RF generation // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. Vol. 47, no. 1. Pp. 1000–1016.
30. Gunin A. V., Klimov A. I., Korovin S. D. et al. Relativistic X-band BWO with 3-GW output power // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26, no. 3. Pp. 326–331.
 31. Бугаев С. П., Канавец В. И., Кошелев В. И., Черепенин В. А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1991. С. 296.
 32. Fuks M., Shamiloglu E. Rapid start of oscillations in a magnetron with a "transparent" cathode // Physical Review Letters. 2005. Vol. 95. P. 205101.
 33. Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. High power microwaves. Wiley-IEEE Press, 2007. P. 531.
 34. Беличенко В. П., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015. С. 483.
 35. Yamasaki F. S., Schamiloglu E., Rossi J. O., Barroso J. J. Simulation studies of distributed nonlinear gyromagnetic lines based on LC lumped model // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44, no. 10. Pp. 2232–2239.
 36. Yamasaki F. S., Rossi J. O., Barroso J. J. et al. Operation analysis of a novel concept of RF source known as gyromagnetic line // Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC). Aguas de Lindoia, Brazil. 2017. Pp. 1–4.
 37. Leblond H. The reductive perturbation method and some of its applications // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2008. Vol. 41, no. 4. P. 043001.
 38. Бикбаев Р. Ф. Об ударных волнах в одномерных моделях с кубической нелинейностью // ТМФ. 1993. Т. 97, № 2. С. 191–212.
 39. Bikbaev R. F. Shock Waves in the Modified Korteweg-de Vries-Burgers Equation // J. Nonlinear Sci. 1995. Vol. 5. Pp. 1–10.
 40. 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.
 41. Taylor J. D. Introduction to ultra-wideband radar systems. CRC Press, 1995. P. 670.
 42. Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems., 2002.