

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

На правах рукописи

Богачев Николай Николаевич

РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ИЗЛУЧЕНИЕ СИГНАЛА
ПЛАЗМЕННОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННОЙ

1.3.9 – Физика плазмы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., проф. Гусейн-заде Н.Г.

Москва
2021

Оглавление

Список условных сокращений и обозначений.....	3
Введение.....	4
Глава 1. Плазменные антенны	13
1.1. Плазменные антенны и плазменные технологии в антенной технике	13
1.2. Плазменные антенны из газоразрядных трубок	17
1.3. Плазменная несимметричная вибраторная антенна	23
Глава 2. Выбор численной модели плазменной антенны и описание экспериментальных стендов для измерения характеристик антенн.....	40
2.1 Численные методы и программные комплексы, используемые при моделировании антенно-фидерных устройств	40
2.2. Экспериментальные стенды для исследования диаграммы направленности и спектра излучаемого сигнала антенн	49
2.3. Выбор и описание численных моделей плазменной антенны	55
Глава 3. Поверхностная электромагнитная волна и режимы работы плазменной несимметричной вибраторной антенны	61
3.1. Поверхностная электромагнитная волна на плазменном цилиндре.....	61
3.2. Режимы существования поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре.....	63
3.3. Режимы работы плазменной несимметричной вибраторной антенны.....	71
3.4. Экспериментальные измерения диаграммы направленности ПНВА и МНВА	75
Глава 4. Сигнал плазменной несимметричной вибраторной антенны.....	78
4.1. Сравнение экспериментальных спектральных характеристик излучаемого сигнала ПНВА и МНВА	78
4.2. Характеристики излучаемого сигнала ПНВА в численном моделировании	83
Заключение	88
Список литературы	89

Список условных сокращений и обозначений

БСЧ – быстрое свипирование по частоте

ВЧ – высокочастотный

ВЩА – волноводно-щелевая антенна

ДН – диаграмма направленности

ИСС – идеально согласованный слой

КПД – коэффициент полезного действия

КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

ЛОВ – лампа обратной волны

МКРВО – метод конечных разностей во временной области

МКЭ – метод конечных элементов

ММ – метод моментов

МНВА – металлическая несимметричная вибраторная антенна

НВ – несимметричный вибратор

НЧ – низкочастотный

ПНВА – плазменная несимметричная вибраторная антенна

ПЭВ – поверхностная электромагнитная волна

САПР – система автоматизированного проектирования

СВЧ – сверхвысокочастотный

УМ – усилитель мощности

ЧМ сигнал – частотно-модулированный сигнал

ЭДС – электродвижущая сила

ЭМ – электромагнитный

FDTD – Finite Difference Time Domain

FEM – Final Element Method

FFS – Fast Frequency Sweep

MoM – Method of Moments

PIC – Particle-in-Cell

PML – Perfect Matching Layer

PSiAn – Plasma Silicon Antenna

TEM – Transverse Electromagnetic

Введение

Плазменные антенны – класс антенн, в котором в качестве волноведущих, излучающих и управляющих элементов используется ионизованная среда (плазма). Основными преимуществами таких антенн перед традиционными металлическими антеннами являются малая радиолокационная заметность, возможность быстрого включения/выключения и электронного изменения параметров. Электрическое управление параметрами и характеристиками плазменной антенны осуществляется путём изменения параметров плазмы (концентрации, частоты столкновений, длины плазменного образования). Вышеперечисленные свойства плазменных антенн актуальны в высокоскоростных и помехоустойчивых телекоммуникационных системах, а также системах радиолокации и связи объектов вооружения и военной техники. В настоящее время плазменные антенны исследуются и разрабатываются научными группами в разных странах мира.

В плазменных технологиях в антенной технике можно выделить несколько направлений: плазменные антенны из газоразрядных трубок; плазменные полупроводниковые антенны; струйные плазменные антенны и др.

Плазменные антенны из газоразрядных трубок – самое обширное направление исследований. В режиме радиомолчания радиотехнической системы, когда такие антенны «выключены», то диэлектрическая трубка с газом почти не отражает, а в режиме работы *малая радиолокационная заметность* (малая эффективность площади рассеяния) обусловлена тем, что плазма отражает радиоволны меньше, чем металлическая антенна аналогичных размеров [1]. *Быстрое включение/выключение* плазменных антенн по сравнению с металлическими аналогами, требующими механического извлечения из радиомаскирующего укрытия, обеспечивается ионизацией и рекомбинацией плазмы за время порядка

единиц микросекунд [2]. *Улучшение электромагнитной совместимости* достигается заменой нескольких антенн от непостоянно работающих радиотехнических систем на одну плазменную с попеременным подключением к ней соответствующих систем.

Объектом исследования диссертационной работы является *плазменная несимметричная вибраторная антенна (ПНВА)*.

Этот тип антенн исследуется с конца XX века, были созданы работающие образцы, частично исследованы их характеристики. Однако ещё остаётся ряд нерешённых фундаментальных вопросов, в частности, плохо исследованы нелинейные зависимости характеристик антенн (диаграммы направленности, мощности излучения и др.) от концентрации плазмы [2-4], что необходимо для определения *оптимального режима работы антенны*. Под *оптимальным режимом работы* в данном случае понимается режим, при котором электрические характеристики плазменной антенны (распределение электрического поля на антенне и диаграмма направленности), а также характеристики излучаемого сигнала (временные и спектральные) близки к характеристикам аналогичной металлической антенны. Слабоизученными являются вопросы о связи условий распространения поверхностной электромагнитной волны и характеристик антенны. Также отсутствуют работы, посвященные комплексным исследованиям излучения сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной, характеристикам антенны и особенностям излучаемого антенной сигнала в диапазоне высоких (ВЧ) или сверхвысоких (СВЧ) частот. Эти исследования необходимы для определения возможностей управления (диапазонов изменения параметров и характеристик плазменных антенн) при которых нет сильных искажений передаваемых сигналов и заметного ухудшения характеристик антенн.

Всё вышеперечисленное обуславливает **актуальность темы диссертационной работы**.

Целью работы является определение режимов работы плазменной несимметричной вибраторной антенны (ПНВА) из газоразрядной трубки и параметров (особенностей) излучаемого ею сигнала, а также сравнения ее характеристик с аналогичными для металлической антенны.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проанализированы программные комплексы для моделирования антенно-фидерных устройств и модели плазменной среды. В электромагнитном коде «КАРАТ» созданы две численные модели плазменной антенны.

2. С помощью аналитических методов и численного моделирования обнаружены и исследованы различные режимы работы плазменной несимметричной четвертьволновой вибраторной антенны, а также исследована связь этих режимов с условиями распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса.

3. С помощью численной PIS-модели плазменной антенны было исследовано влияние плазмы на спектральные характеристики излучаемого сигнала в различных режимах работы антенны.

4. Экспериментально исследованы диаграмма направленности и спектральные характеристики излучаемого сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенны. Проведено сравнение полученных характеристик плазменной антенны с характеристиками аналогичной металлической антенны и результатами моделирования.

Новизна. С помощью численного моделирования впервые были обнаружены три разных режима работы плазменной несимметричной вибраторной антенны (режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный режимы) и показана зависимость этих режимов от параметров плазмы и их связь с распространением поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре

конечного радиуса. Впервые были проведены численные исследования спектральных характеристик сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной в трёх режимах работы, экспериментально исследованы спектральные характеристики излучаемого немодулированного и модулированного сигналов.

Научная значимость полученных результатов. Показана важная роль поверхностной электромагнитной волны в работе плазменной несимметричной вибраторной антенны. Выявлены различные режимы работы плазменной антенны: режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный режимы. Определен диапазон параметров для оптимального режима работы ПНВА – линейного режима. Экспериментально обнаружено усиление высших гармоник в спектре немодулированного сигнала при излучении плазменной несимметричной вибраторной антенной, что отличает её от аналогичной металлической антенны.

Практическая ценность проведённых исследований состоит в том, что определён оптимальный режим работы ПНВА и соответствующий ему диапазон параметров плазмы; смоделированы и измерены характеристики такой антенны и передаваемого ею сигнала. По результатам проведённых исследований предложены рекомендации по оптимизации и использованию плазменной несимметричной вибраторной антенны. По результатам исследований получен патент на изобретение RU 2544806 С1, 20.03.2015 «Плазменная вибраторная антенна с ионизацией поверхностной волной».

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. У плазменной несимметричной вибраторной антенны есть три режима работы, связанные с условиями распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре: режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный. Эти режимы определяются по дисперсионному уравнению для электромагнитной

волны, распространяющейся по поверхности плазменного цилиндра, и зависят от соотношения ленгмюровской частоты плазмы и частоты входной электромагнитной волны. В линейном режиме работы диаграмма направленности и распределение электрического поля вблизи плазменной антенны близки к характеристикам аналогичной металлической антенны.

2. В спектре немодулированного гармонического колебания, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной, составляющие сигнала на второй и третьей гармониках частоты входного колебания имеют амплитуду выше, чем у гармоник в спектре сигнала металлической антенны.

3. Спектральная плотность мощности нелинейных комбинационных частот в спектре узкополосного частотно-модулированного сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной ниже на $20,73 \pm 0,19$ дБ чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной. Спектральная плотность мощности на второй гармонике частоты модулирующего колебания в спектре детектированного сигнала, принятого от плазменной антенны, на $8,35 \pm 0,19$ дБ меньше чем для сигнала от аналогичной металлической антенны.

Достоверность основных положений, выводов и результатов работы подтверждается: адекватностью (с учётом принятых допущений) разработанных численных моделей реальным объектам; соответствием результатов, полученных экспериментально и на основе расчетов с использованием известного математического аппарата, программ и методов компьютерного моделирования; согласованностью ряда полученных результатов с результатами, полученными другими авторами.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационных исследований неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях (11

докладов) [9a,12a-21a], а также на научных семинарах ИОФ РАН и РТУ МИРЭА:

- XXXIX Международная звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Москва, февраль 2012, с. 269
- 25-th, 26-th Symposium on Plasma Physics and Technology, Prague, Czech Republic, 2012, 2014.
- I и III Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем РАДИОИНФОКОМ – 2013, 2017, МГТУ МИРЭА, г. Москва, 2013, 2017 г.
- V Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, ФИАН, г. Москва, 10-15 ноября 2013 г.
- I Всероссийская микроволновая конференция, ИРЭ им В.А. Котельникова РАН, г. Москва, 2013
- The 10-th European Conference on Antennas and Propagation, Davos, Switzerland, 10-15 April 2016.
- X Конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение», Москва, 14-16 ноября 2016 г.
- III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017», Москва, 24-27 января 2017 г.
- VI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Москва, 17–21 апреля 2017 г.
- XXXIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG-2017), Estoril, Lisbon, Portugal, 9-14 July 2017

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня

ВАК [1a-11a], из которых 7 входят в международные базы данных WoS и SCOPUS. Получен 1 патент РФ на изобретение [22a].

Личный вклад автора состоит в участии в постановке задачи, планировании экспериментов и анализе полученных результатов. Численные расчеты, представленные в диссертации, проводились лично автором или при его непосредственном участии. Изложенные в работе результаты экспериментальных исследований получены лично диссертантом.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 102 страницы, включая 41 рисунка и 4 таблицы. Библиографический список содержит 120 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, приведено краткое изложение основных разделов диссертации.

В **главе 1** описаны плазменные технологии в антенно-фидерных устройствах. В параграфе 1.1 приведена классификация плазменных антенн и сделан обзор работ, посвященных плазменным антеннам и плазменным технологиям в антенной технике. Рассмотрены преимущества и недостатки различных конструкций и типов антенн. Раздел 1.2 посвящён плазменным антеннам из газоразрядных трубок. В 1.3 отдельно и достаточно подробно рассмотрены результаты исследований плазменной несимметричной вибраторной антенны (виды конструкций и основные характеристики).

Глава 2 посвящена методам исследования характеристик плазменной несимметричной вибраторной антенны, как экспериментальных, так и численных. В 2.1 рассмотрены основные численные методы и программные комплексы, используемые для

моделирования антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн. Параграф 2.2 посвящён описанию методик и лабораторного стенда, использованных при проведении экспериментальных исследований диаграмм направленности и спектров излучения плазменной и металлической несимметричных вибраторных антенн.

В параграфе 2.3 проведено сравнение работы основных программных комплексов для моделирования антенн (MMANNA, EMPro, KARAT). По результатам сравнения численного моделирования и экспериментальных измерений диаграммы направленности антенн было отдано предпочтение полному электродинамическому коду KARAT. В 2.3 представлены используемые численные модели плазменной несимметричной вибраторной антенны в коде KARAT. В первой модели плазма рассматривается как среда с диэлектрической проницаемостью, определяемой по формуле Друде, а во второй модели плазма задаётся с помощью метода «частица в ячейке» (PIC-метод).

В главе 3 приведены результаты аналитических и численных исследований режимов работы и характеристик плазменной несимметричной вибраторной антенны, их связи с режимами распространения поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) на плазменном цилиндре, а также сравнение расчетных и экспериментальных диаграмм направленности ПНВА и МНВА. Параграф 3.1 посвящён вопросам распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре. В 3.2 исследуется дисперсионное уравнение поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся на плазменном цилиндре конечного радиуса, для различных параметров электронной концентрации и частоты электронных столкновений в плазме. Полученные дисперсионные кривые демонстрируют существование трёх режимов распространения ПЭВ на плазменном цилиндре конечного радиуса, которые определяются соотношением плазменной частоты и частоты подаваемой электромагнитной волны. В 3.3 представлены

результаты исследования распределения компонент напряженности электрического поля в ближней зоне антенны и проводится сравнение расчетных диаграмм направленности плазменной антенны в трёх режимах работы антенн с результатами экспериментальных измерений.

Глава 4 посвящена численному и экспериментальному исследованиям спектральных характеристик немодулированного и модулированного сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной. В начале главы представлены результаты экспериментальных исследований спектрального состава сигналов, излучаемых как плазменной несимметричной вибраторной антенной, так и аналогичной металлической антенной. Для понимания физики протекающих процессов при излучении сигнала в 4.2 представлен спектральный состав сигнала, полученного с помощью численного моделирования плазменной вибраторной антенны в различных режимах работы.

В заключение кратко перечислены основные результаты диссертационной работы.

Глава 1. Плазменные антенны

В данной главе приведен обзор существующих плазменных антенн различных конфигураций, особое внимание уделяется плазменным антеннам из газоразрядных трубок, как самому популярному классу плазменных антенн. Также в этой главе рассмотрены достоинства и недостатки нескольких конструкций плазменной несимметричной вибраторной антенны, дано описание предложенной конструкции, которая исследуется в данной работе.

1.1. Плазменные антенны и плазменные технологии в антенной технике

Использование ионизированной среды для передачи и приема электромагнитных волн восходит к опытам с вибратором и искровым передатчиком Г. Р. Герца в 1888 году, т.е. до начала использования металлических антенн. Сама идея использования ионизированной среды (плазмы) в качестве антенны была запатентована англичанином Джоном Хеттинджером в США в 1919 году (заявка 1917 года) [5]. В патенте «Воздушный проводник (антенна) для беспроводной связи и других приложений» описаны различные модификации антенн из «ионизированного луча (лучей) или среды» и впервые предложено их использование для передачи энергии низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) колебаний на расстоянии в беспроводной телеграфии, телефонии и других приложениях.

Дж. Хеттинджер предложил в качестве антенны использовать «ионизированный луч», получаемый с помощью ультрафиолетового излучения от дуги или ртутной лампы. В этом патенте описаны схемы возбуждения «луча» НЧ и ВЧ колебаниями: искровым промежутком, трансформатором, с помощью колебательного контура (слева направо, рисунок 1.1а), с параллельным возбуждением нескольких лучей (рисунок

1.1б). Также в патенте приведено описание схемы создания ионизованного луча и его возбуждения с использованием одного источника колебаний (рисунок 1.1в).

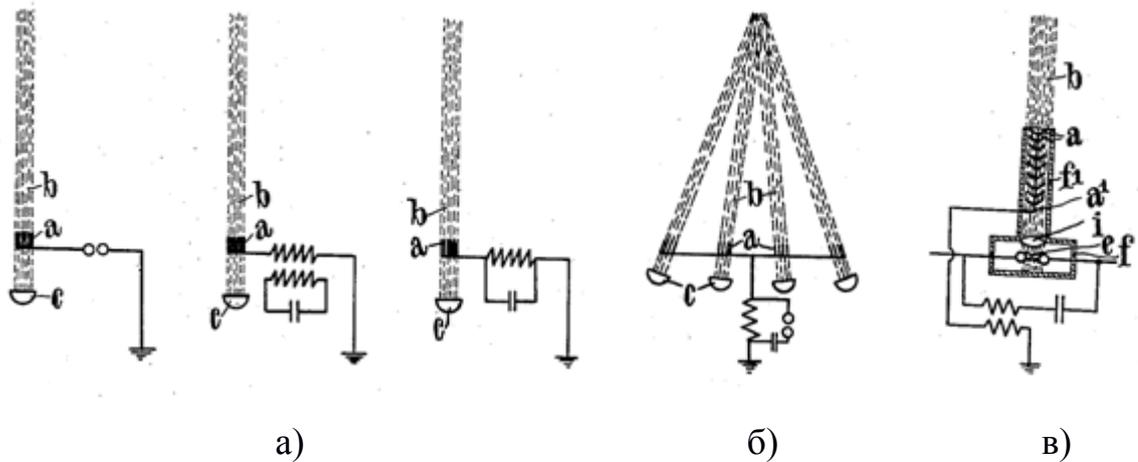


Рисунок 1.1. Схемы использования «ионизованного луча» в качестве антенны из [5].

Большинство предложенных Дж. Хетинджером идей долгое время оставались без внимания. Интерес к плазменным технологиям в антенной технике возобновился в середине XX века. В отдельных работах (например, в [6]) появилась информация о проведении исследований по созданию плазменных антенн с использованием факелов реактивных двигателей ракет.

Идеи, выдвинутые Д. Хетинджером, стали развиваться в середине XX века. Был предложен ряд новых конструкции и применения плазменных антенн в патентах [7,8]. Вопрос эффективности данных конструкций до сих пор остается открытым.

Отдельно стоит отметить исследования влияния плазмы на характеристики металлических антенн, которые были начаты в 60-70-ые годы XX века и с разной интенсивностью продолжаются до настоящего времени [9-19]. В этих работах проводились теоретические и экспериментальные исследования характеристик (входной импеданс антенны и распределение тока) коротких, тонких металлических вибраторных антенн (диполей), помещённых в плазменную среду, как с

магнитным полем, так и без него. Необходимость данных исследований была обусловлена двумя причинами: влияние плазмы в магнитосфере Земли на излучение антенн космических аппаратов, изучение работы плазменных устройств с излучателями электромагнитных волн. С применением квазистатической теории электромагнитного поля и решения волнового уравнения получены выражения для импеданса дипольной (вibratorной) антенны в магнитосферной плазме [10,11]. Полученные результаты теоретических расчётов двумя методами сравнивались между собой и с результатами экспериментальных измерений. Работы [12-14] связаны с построением теории тонких цилиндрических антенн в анизотропной плазме. В этих работах рассмотрены результаты аналитических и численных расчётов входной проводимости и распределения тока. В этих работах проводились исследования характеристик (входной импеданс антенны и распределение тока) коротких, тонких металлических vibratorных антенн (диполей), помещённых в плазменную среду, как с магнитным полем, так и без него. Полученные результаты продемонстрировали, что плазма существенно меняет эти параметры.

В конце 80-х – начале 90-х XX века [15-17] было продолжено изучение влияния ограниченной в объёме магнитоактивной плазмы на характеристики помещённых в неё коротких металлических антенн. Результаты продемонстрировали улучшение согласования антенны с генератором, повышение эффективности излучения и др. В работах [15,16] исследовались характеристики электрически короткой vibratorной антенны в ограниченном объёме распадающейся магнитоактивной плазмы, создаваемой в аргоне импульсным безэлектродным методом и с применением постоянной вакуумной откачки. Было показано, что в этих условиях возможно заметное улучшение согласования антенны с генератором и повышение (по напряженности поля более чем в 30 раз) эффективности излучения по сравнению с излучением без плазмы. В

работе [17] показано, что все эти свойства антенны в плазме сохраняются в стационарном разряде с магнитным полем и без него. Интерес к таким исследованиям был связан с уменьшением габаритных размеров антенн для диапазона длинных волн. Ряд теоретических исследований продолжаются и в XXI веке [18-22].

Одновременно с этими исследованиями были начаты исследования по применению других плазменных технологий в антенной технике. Можно выделить несколько таких направлений:

- плазменная твердотельная (кремниевая) антенна – Plasma Silicon Antenna (PSiAn) [23,24];
- плазменные антенны космического базирования [25,26];
- антенны из плазменных струй [27-33];
- лазерные плазменные антенны [8, 34-37];
- плазменные антенны из газоразрядных трубок;
- другие плазменные антенны [38-40].

Большинство из перечисленных направлений развития плазменных антенн активно исследуются в последние годы и являются перспективными для применения в различных областях. Рассмотрим подробнее способы создания плазменных антенн, области их применения и возможность использования для решения задач современных радиотехнических и телекоммуникационных систем.

Данная диссертация посвящена исследованию плазменной несимметричной вибраторной антенны – одного из наиболее популярных типов плазменных антенн из газоразрядных трубок. Такие антенны сочетают в себе преимущества других типов плазменных антенн и лишены влияния окружающего пространства на параметры формируемой плазмы и характеристики антенны.

1.2. Плазменные антенны из газоразрядных трубок

В России в 1994 году в работах [41, 42] было дано описание плазменной антенны из газоразрядной трубки для излучения сигналов несинусоидальной формы. Эта антенна в заявке на изобретение [41] называется антенной «Крымского-Шульженко». Однако мировое научное сообщество началом активных исследований плазменных антенн считает работы групп Г. Борга в Австралии [43,44] и И. Алексефа и Т. Андерсона в США [45-47] рубежа 1990-ых и 2000-ых годов.

Плазменные антенны из газоразрядных трубок представляют собой антенны, в которых в качестве излучающих, отражающих и волноведущих элементов используется плазма в диэлектрических газоразрядных трубках. Газоразрядные трубки в основном изготавливаются из стекла или кварца и заполняются инертным газом (аргон, неон или ксенон) при низких давлениях от 0,01 до 4 торр (мм.рт. ст.) и с добавлением насыщенных паров ртути при различных давлениях. В настоящее время исследуются различные типы плазменных антенн из газоразрядных трубок. По аналогии с типами металлических антенн их можно разделить на:

- Линейные плазменные антенны (рамочные и вибраторные);
- Плазменные антенны бегущей волны;
- Плазменные зеркальные (рефлекторные) антенны;
- Волноводно-щелевые плазменные антенны;
- Плазменные антенные решетки и интеллектуальные («умные») антенны.

Первая действующая антенна из газоразрядной плазмы в диэлектрической трубке [41,42] – рамочная антенна Крымского-Шульженко (рисунок 1.8). Антенна содержит петлевую газоразрядную трубку из молибденового стекла 1, наполненную газом для образования проводника в виде витка плазмы и узел возбуждения 2. На отведенных

концах трубки расположены коваровые высоковольтные электроды 3, 4, на расстоянии от которых расположены высокочастотные электроды 5, 6. Электроды 3 и 4 служат для создания плазмы в трубке, они подключены к источнику высокого напряжения через цепь резистор 7 – индуктивность 8 – высоковольтный разъем 9. Резистор 7 служит для ограничения тока разряда, а индуктивность 8 для развязки генератора импульсов и источника высокого напряжения по высокой частоте. Высокочастотные электроды 5, 6 через проходные конденсаторы 10 соединены с высокочастотным разъемом генератора наносекундных импульсов (для передачи сигналов). Один конец трубки запаян, а второй через запорный вентиль 12 соединен с вакуумной установкой. Вся конструкция, кроме плазменного витка, заключена в замкнутый медный корпус 13. Целью создания такой антенны авторы указывают излучение несинусоидальных волн с электрически управляемыми параметрами для подповерхностного зондирования, измерения несинусоидальных помех, имитации электромагнитного импульса молниевых разрядов. Электрическое управление параметрами антенны производится с помощью изменения проводимости плазмы в газоразрядной трубке при варьировании напряжения на высоковольтных электродах 3, 4. В [42] опубликованы результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований плазменной рамочной антенны. Авторами были проведены теоретические расчеты параметров плазменной антенны и разработаны методы расчета плазменных излучателей для формирования электромагнитных полей с заданной пространственно-временной структурой и математическая модель плазменного излучателя произвольной формы. Результаты экспериментального исследования показали, что амплитуда сигнала, излучаемого плазменной рамочной антенной, в 3 раза меньше, чем аналогичной металлической антенны при рассчитанной проводимости плазмы в антенне в 150 раз меньше, чем металла. Кроме того, с помощью изменения амплитуды постоянного напряжения была показана

возможность управления характеристиками антенны (КПД и амплитудой излучаемого сигнала). Исследования плазменной рамочной антенны были проведены также в работах [45-50]. В этих работах были проведены расчёты концентрации и проводимости плазмы для такого типа антенн, с помощью численного моделирования и экспериментальных измерений исследованы входной импеданс, КСВН, КПД, диаграмма направленности, зависимость входной ЭДС антенны от тока в разрядной трубке.

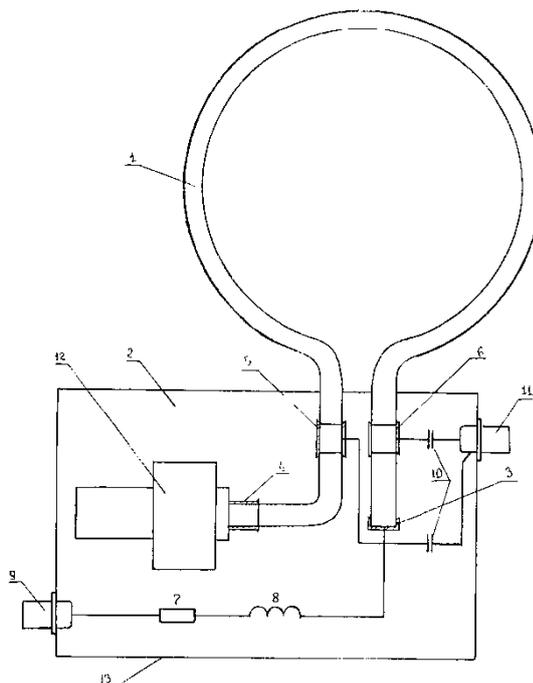


Рисунок 1.8. Плазменная рамочная антенна Крымского-Шульженко[41,42].

С 1999 года проводятся исследования плазменной несимметричной вибраторной антенны [43,44,50-62]. Первыми работами, в которых обсуждаются теория, экспериментальные исследования и возможное применение этих плазменных антенн являются работы Г.Г. Борга с сотрудниками из австралийского университета в Канберре [43,44]. В этих работах на лабораторном макете приемно-передающей вибраторной плазменной антенны исследуется её диаграмма направленности и излучаемая мощность. Более подробно конструкция и характеристики плазменной вибраторной антенны рассмотрены в параграфе 1.3.

Плазменные волноводно-щелевые антенны с управляемой диаграммой направленности были исследованы в работах [63-66]. Антенна

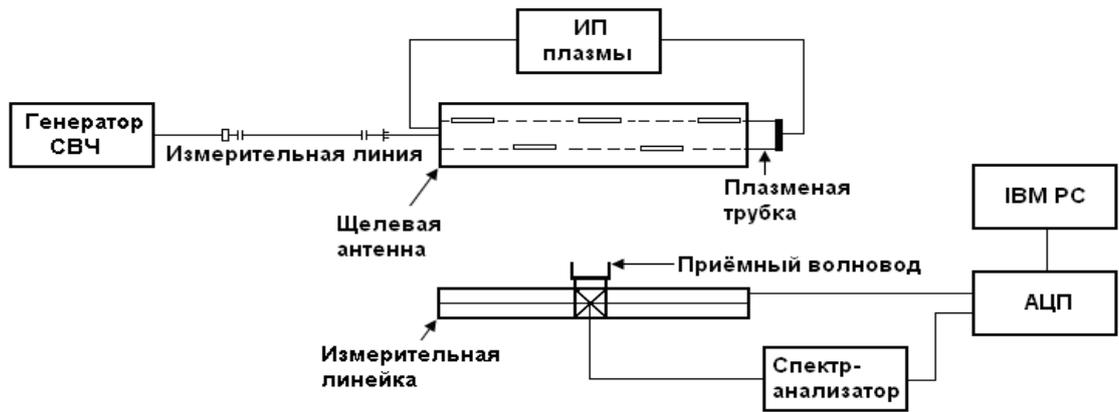
представляет собой металлическую волноводно-щелевую антенну с диэлектрической трубкой с плазмой внутри (рисунок 1.9а) и источником импульсов постоянного тока с управляемыми характеристиками (рисунок 1.9б). Диаграмму направленности (ДН) волноводно-щелевых антенн (ВЩА) можно изменять, меняя фазовую скорость объемной электромагнитной волны в волноводе за счет изменения диэлектрической проницаемости. Это достигается изменением плотности плазмы, зажигаемой в промышленной газоразрядной трубке лампы дневного света, такая газоразрядная трубка помещается внутрь волновода с излучающими щелями. Управляя разрядным током можно легко менять плотность плазмы и, тем самым, изменять эффективную диэлектрическую проницаемость внутри волноводной области. Схема, вид экспериментальной установки и диаграммы направленности для плазменной ВЩА с пятью щелями приведены на рисунке 1.9.

Как видно из рисунка 1.9в при возникновении плазмы в трубке и увеличении величины протекающего через нее тока (плотности плазмы) изменяется направление максимума диаграммы направленности. Управление производится включением источника питания плазмы и регулировкой силы тока, что свидетельствует о малых временах перестройки и приближает данную антенну к современным фазированным антенным решеткам с электрическим управлением ДН, при более простой структуре и низкой себестоимости ВЩА с диэлектрической трубкой.

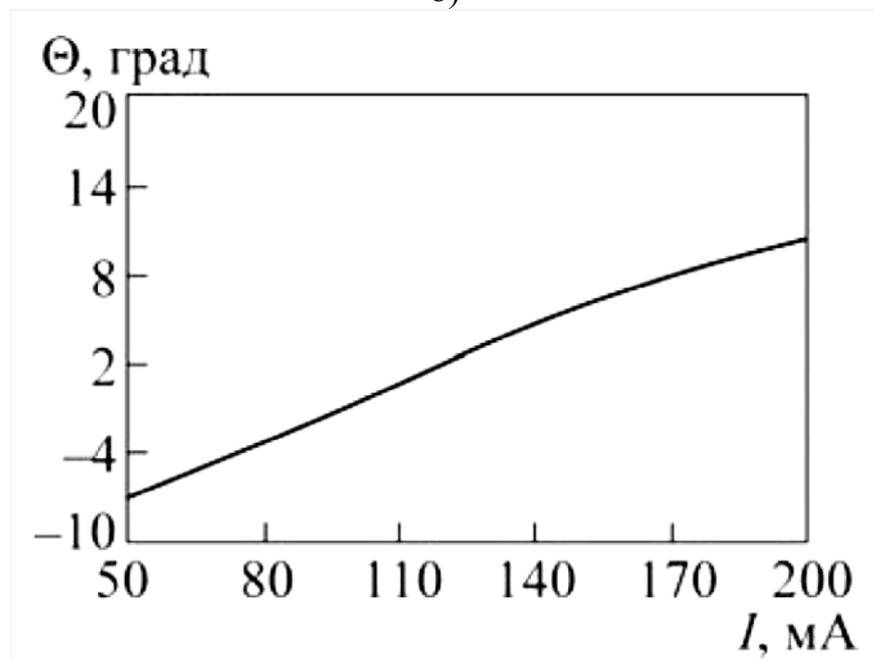
Ещё одним типом плазменных антенн из газоразрядных трубок является плазменная зеркальная (рефлекторная) антенна [66-69]. Такие антенны состоят из облучателя в виде рупорной антенны и рефлектора из диэлектрических газоразрядных трубок с плазмой, создаваемой импульсами от источника высокого напряжения. На рисунке 1.10 приведены фотографии плазменных зеркальных антенн.



а)



б)



в)

Рисунок 1.9. Плазменная ВЦА с управляемой ДН [54-57]: а) фотография лабораторной модели, б) структурная схема лабораторной модели, в)

Зависимость углового положения основного максимума ДН относительно нормали к плоскости щелевой антенны от тока в газоразрядной трубке.

На рисунке 1.11 показана диаграмма отражения плазменного (синим цветом) и металлического (красным) отражателей. Из рисунка 1.11 видно хорошее соответствие диаграмм рассеянного излучения плазменного и металлического рефлекторов, при этом паразитные боковые лепестки плазменного рефлектора более узкие и имеют меньшую амплитуду. Плазменный рефлектор рассеивал излучение только в процессе горения плазмы.

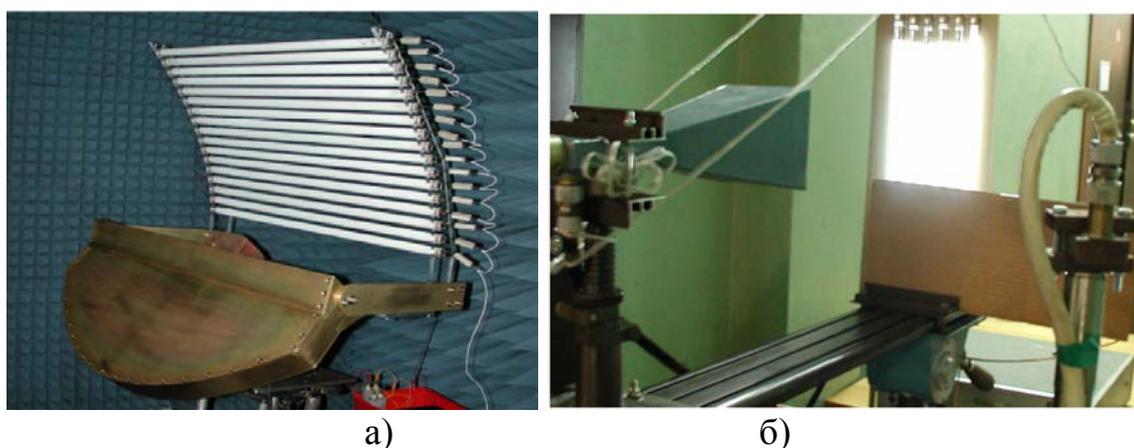


Рисунок 1.10. Фотографии плазменных зеркальных антенн: а) из работы [66, 67], б) из работ [69].

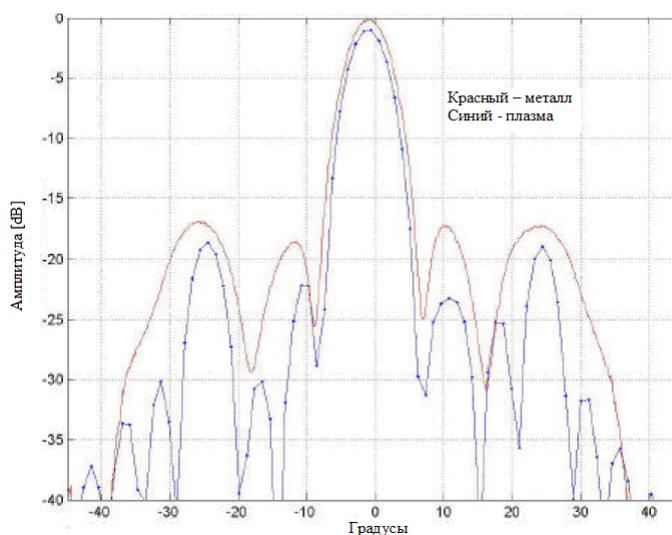


Рисунок 1.11. Диаграмма отражения плазменного и металлического рефлектора [67].

В работах [66,69] в ходе численных и экспериментальных исследований плазменной зеркальной антенны для случаев E - и H -поляризации электромагнитной волны были получены зависимости коэффициента прохождения T от соотношения периода решетки из газоразрядных трубок d к длине излучаемой волны λ (5 см; $f=6$ ГГц) и угла падения электромагнитной волны.

1.3. Плазменная несимметричная вибраторная антенна

Антенны вибраторного типа (диполи) представляют собой практическую реализацию элементарного излучателя – диполя Герца, впервые использованную ещё самим Герцем в своих исследованиях в 1886—1888 гг. Традиционно, антенны вибраторного типа выполняются из металлических проводов, лент или труб и питаются как двухпроводными фидерами, так и коаксиальными кабелями.

1.3.1. Общие сведения о несимметричных вибраторных антеннах

Существует большое разнообразие симметричных и несимметричных вибраторов и способов их питания. К вибраторным антеннам традиционно предъявляются следующие требования: возможная простота конструкции и эксплуатации; симметричная диаграмма направленности в плоскости E , круговая диаграмма направленности в плоскости H , низкий КСВН в линии питания в относительно широкой полосе рабочих частот; наличие регулировочных элементов, заданный уровень излучаемой спектральной плотности мощности (для передающих антенн); высокий КПД, устойчивый режим работы при воздействии дождя и мокрого снега, малый уровень кроссполяризованного излучения; удобное крепление на опоре, обеспечение молниезащиты и защиты от статических зарядов.

На рисунке 1.12а показан вертикальный вибратор с проводящим диском, к которому присоединяется внешний проводник коаксиальной линии. Диск может быть заменен четырьмя (рисунок 1.12б)

горизонтальными проводами длиной $\lambda/4$ каждый. В другом случае диск или провода, играющие роль противовеса, могут быть заменены, как это показано на рисунке 1.12в, четвертьволновым стаканом, закороченным на одном конце. Во всех случаях возбуждение производится таким образом, что совместно с экраном (противовесом, стаканом) образуется полуволновый вибратор [61].

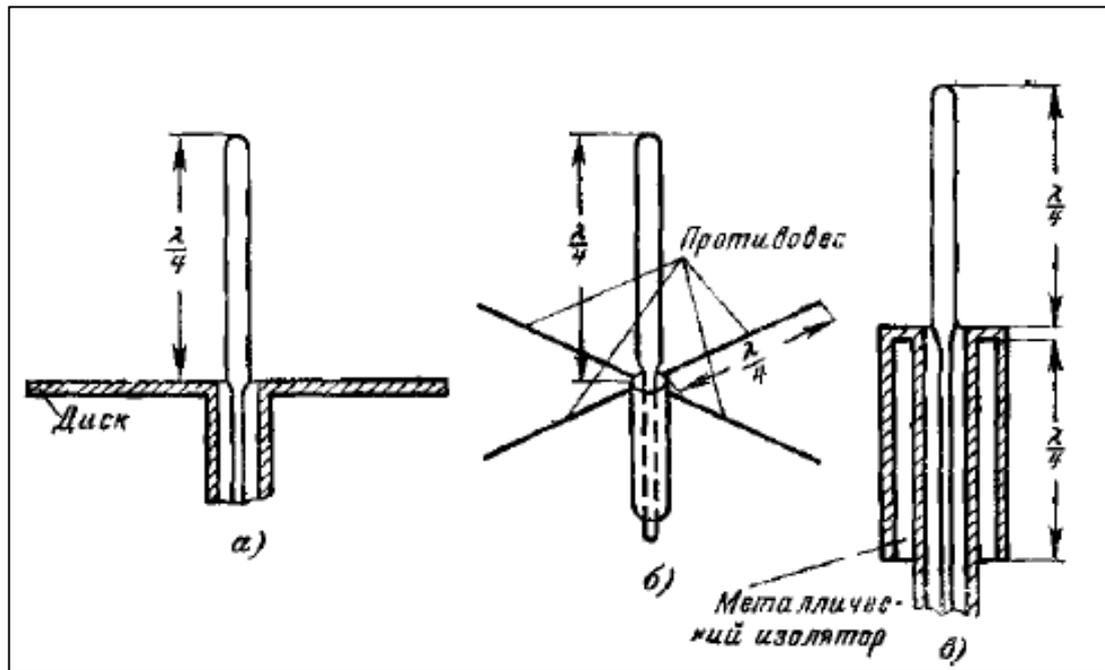


Рисунок 1.12 Несимметричные полуволновые вибраторы.

а) несимметричный вибратор с круглым диском, б) несимметричный вибратор с четырьмя противовесами, в) несимметричный вибратор с четвертьволновым стаканом [70].

В диссертационной работе рассматривается несимметричный электрический вибратора длиной l с противовесом в виде металлического диска радиусом R (см. рисунок 1.12а).

Распределение тока I_z и заряда Q_z по оси Oz такого несимметричного вибратора описывается аналогично случаю симметричной вибраторной антенны [71-75]:

$$I_z = I_m \cos(k_a z); \quad Q_z = Q_m \sin(k_a z), \quad (1.1)$$

где $k_a = \frac{2\pi}{\lambda_a}$ – волновое число антенны, $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

где ω, λ, c – круговая частота колебаний, длина волны и скорость света соответственно. Причем $\lambda_a = \frac{\lambda}{\xi}$; $\xi = \frac{c}{v_f}$ – коэффициент укорочения длины волны в вибраторе, v_f – фазовая скорость в антенне; I_m и Q_m – максимальные амплитуды распределения тока и заряда.

Угловое распределение интенсивности излучения (диаграмма направленности) симметричной вибраторной антенны (диполя) длиной $2l$ в E -плоскости (в меридиональной плоскости) рассчитывается по формуле

$$F(\theta) = \frac{\cos(k_a l \sin \theta) - \cos k_a l}{\sin \theta}, \quad (1.2)$$

где θ – угол, отсчитываемый от оси Oz вибратора. В случае несимметричного вибратора (монополя) в этих формулах длина плеча симметричного вибратора (диполя) l считается длиной монополя.

Функция $F(\theta)$ определяет интенсивность излучения антенны dW в элемент телесного угла $d\Theta$ вблизи угла θ , т.е.

$$dW = \frac{Z_0 I_{\max}^2 |F(\theta)|^2}{4\pi} d\Theta, \quad (1.3)$$

где I_{\max} – максимальный ток антенны, $Z_0 = 120\pi$ – волновое сопротивление вакуума. Излучение поляризовано в плоскости, проходящей через антенну и точку наблюдения.

Функция $F(\theta)$ определяется величиной $k_a l$. Выражения (1.2) и (1.3), подходят для любых значений этой величины и должны давать одинаковые диаграммы направленности излучения при заданном параметре $k_a l$. Наибольший интерес представляют два случая: когда длина $l = \lambda_a/4$ ($k_a l = \pi/2$) монополя равна одной или двум четвертям (половине) длины волны антенны $l = \lambda_a/2$ ($k_a l = \pi$). В этих случаях

$$\frac{dW}{d\Theta} = \frac{Z_0 I_{\max}^2}{4\pi \sin^2 \theta} \begin{cases} \cos^2 \frac{\pi \cos \theta}{2}, & (l = \frac{\lambda_a}{4}); \\ 4 \cos^4 \frac{\pi \cos \theta}{2}, & (l = \frac{\lambda_a}{2}). \end{cases} \quad (1.4)$$

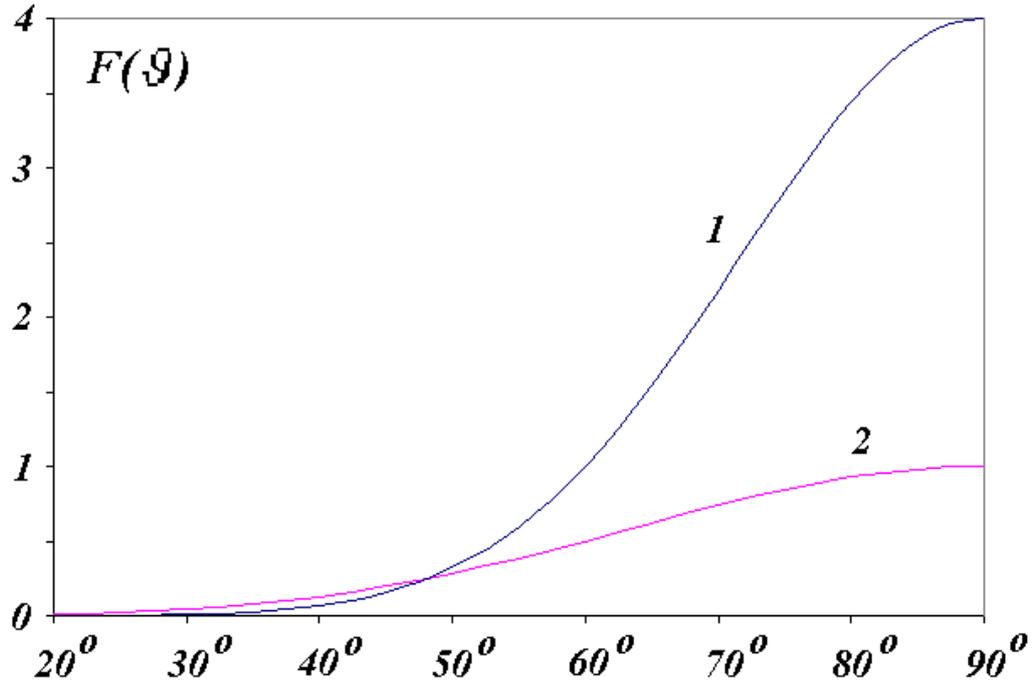


Рисунок 1.13 Диаграммы направленности симметричных вибраторов:
1 – полуволнового диполя, $2l = \lambda/2$; 2 – волнового диполя, $2l = \lambda$ [75].

Диаграммы направленности (4) похожи (см. рисунок 1.13). Но при $l = \lambda_a/4$ диаграмма направленности шире, чем при, $l = \lambda_a/2$, а максимальная интенсивность под углом $\theta = \pi/2$ к оси антенны в первом случае в четыре раза больше, чем во втором:

$$W = \frac{Z_0 I_{\max}^2 \Theta}{4\pi}, \quad (1.5)$$

где $\zeta = \int |F(\theta)|^2 d\Theta$: $\Theta = 2,44$ при $l = \lambda_a/4$ и $\Theta = 6,70$ при $l = \lambda_a/2$.

Эквивалентное сопротивление излучения R_{Σ} , которое в теории антенн определено как условное активное сопротивление, поглощающее мощность излучения антенны

$$W = \frac{1}{2} I_{\max}^2 \cdot R_{\Sigma}, \quad (1.6)$$

где $R_{\Sigma} = 60\Theta$ Ом. Оно характеризует действительную часть входного сопротивления антенны $Z_A = R_A + iX_A = R_{\Sigma} + R_L + iX_A$, а также КПД антенны $\eta = R_{\Sigma}/R_A$. Сопротивление излучения четвертьволнового монополя вдвое меньше, чем у диполя, поэтому $R_{\Sigma} = 30\Theta = 73,2$ Ома. Здесь R_L – активное сопротивление, связанное с потерями в антенне. У полуволновой дипольной антенны или четвертьволнового несимметричного вибратора $X_A = 0$. Это позволяет использовать выражение

$$\Gamma = \frac{R_A - Z_C}{R_A + Z_C}, \quad (1.7)$$

для расчета коэффициента отражения от антенны в питающей антенну коаксиальном фидере, где $Z_C = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_c}} \ln \frac{D}{d}$ – волновое сопротивление фидера, заполненного диэлектриком с относительной проницаемостью ϵ_c .

Замена металлического проводника несимметричного вибратора на плазменный столб в газоразрядной трубке приводит к изменению распределения поля в антенне из-за различия в величине проводимости металла и плазмы. Для описания диэлектрической проницаемости плазмы используется формула Друде (модель Друде-Лоренца), изначально предложенная для описания металлов [76-79]:

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu_e)}, \quad (1.8)$$

где $\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m}} = \sqrt{3 \cdot 10^9 n_e}$ – плазменная частота, определяемая концентрацией электронов n_e , их массой m и зарядом e , ν_e – частота упругих столкновений электронов (обратное время релаксации импульса), а ω – циклическая частота электромагнитной волны.

Электромагнитное поле в плазму проникает глубже, чем в металл, что способствует возбуждению на плазменной границе медленных поверхностных электромагнитных волн. На границе металла, благодаря конечному сопротивлению, также существуют поверхностные волны,

например, волна Зоммерфельда на неидеальном проводнике [80-91], однако, из-за высокой проводимости, эффект ее замедления проявляется лишь в пятом знаке скорости света. Глубина проникновения поля в плазму также ограничена, хотя и в меньшей степени, чем в случае металла, однако, главное отличие металлических и плазменных антенн заключено в различии величины наведенных в них токов.

При замене металлического проводника на газоразрядную трубку получаем несимметричную вибраторную антенну, у которой резонансная длина близка к четверти длины волны. Эффективность преобразования электромагнитной волны в излучение в этом случае может быть не хуже, чем у металлического вибратора, как показано в работах [50-55]. При всей простоте конструктивного исполнения МНВА, в случае с ПНВА более остро стоит вопрос оптимального соединения в конструкции решений для ионизации газа в трубке и создания плазмы с высокой проводимостью и согласования фидерного тракта с антенной. Для решения этих задач исследователи и разработчики предложили несколько различных конструкций, перейдем к их рассмотрению.

1.3.2. ПНВА с ионизацией газа от источника переменного напряжения и возбуждением плазмы от ВЧ генератора

В работе [43] предложена схема ПНВА с ионизацией газа в безэлектродной трубке с помощью переменного тока и соединением плазменной антенны через фидерный тракт, представляющий собой коаксиальный кабель и проводящую муфту с возбуждением поверхностной электромагнитной волны (рисунок 1.14). Рассматривается несимметричная вибраторная антенна, у которой проводящий стержень замещен плазменным столбом с концентрацией электронов, многократно превосходящей значение критической концентрации. Выбор конфигурации антенны в виде несимметричного вибратора обусловлен наличием аксиальной симметрии системы антенна-фидер, что облегчило численное и лабораторное моделирование. При уменьшении концентрации плазмы до

двух критических и уменьшении фазовой скорости, длина ПЭВ укорачивается. В работах [43,44] говорится, что ПНВА в четверть длины даже при значительно замедленной ПЭВ сохраняет диаграмму направленности в меридиональной плоскости, но его излучательная эффективность с приближением к отсечке резко падает из-за уменьшения тока и дипольного момента.

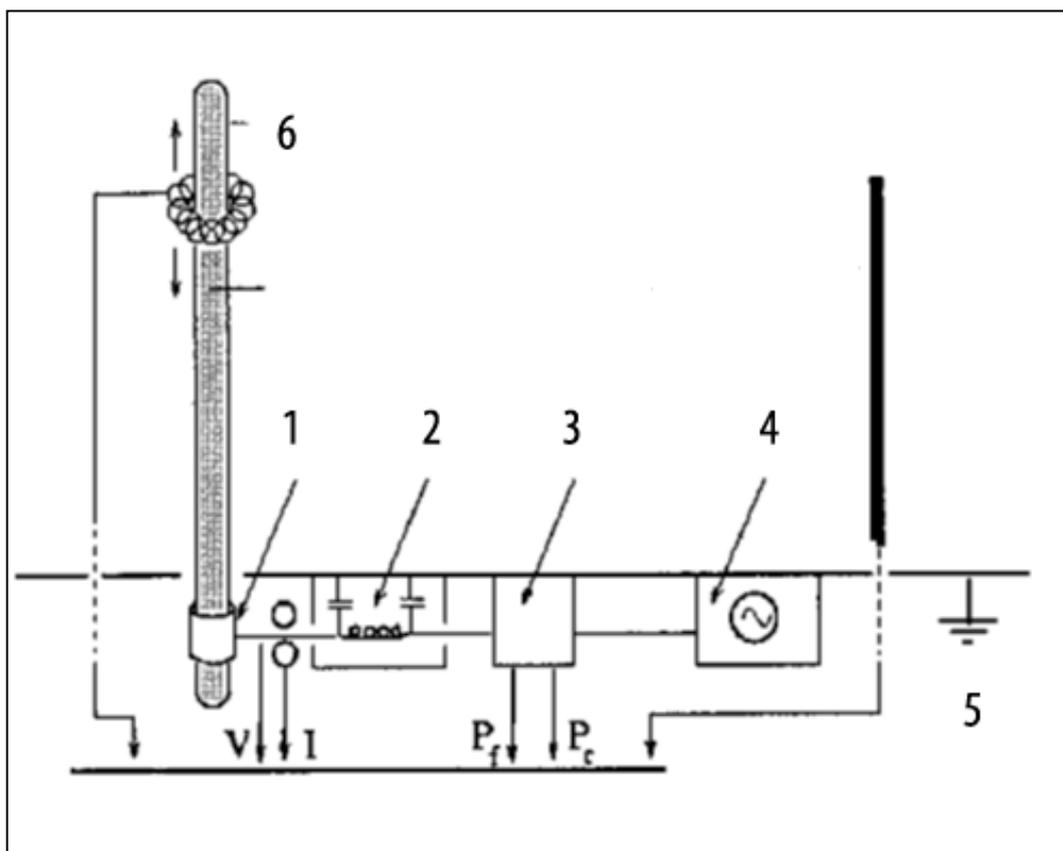


Рисунок 1.14 - Схема экспериментальной установки ПНВА с соединительной муфтой [43]: 1 – соединяющая муфта, 2 – делитель напряжения, 3 – измеритель КСВН, 4 – генератор напряжения, 5 – заземление, 6 – трансформатор тока.

На рисунке 1.3 показана схема экспериментальной ПНВА. Медная цилиндрическая муфта 1 обернута вокруг основания без электродной трубки, которая содержит инертный газ аргон при низком давлении в 1 торр и помещена над заземленным экраном. Муфта 1 соединена с ВЧ генератором 4, через делитель напряжения 2 и измеритель КСВН 3,

предназначена для возбуждения поверхностной электромагнитной волны на границе плазма-диэлектрик в трубке и подведения волны от генератора к антенне. Трансформатор б используется для создания плазмы в трубке с помощью переменного тока.

На рисунке 1.15 приведены диаграмма направленности (ДН) ПНВА такой конструкции (рисунок 1.15а) и диаграмма направленности МНВА (рисунок 1.15б). Можно отметить немного меньшую амплитуду ДН и мощность плазменной антенны.

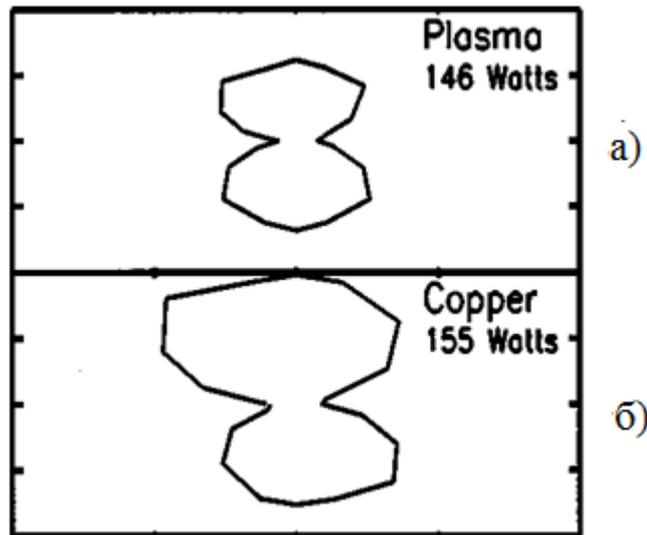


Рисунок 1.15 - Диаграмма направленности ПНВА (а) и МНВА (б) [44].

К достоинствам такой антенны следует отнести близость её характеристик к характеристикам МНВА. Недостатками данной конструкции являются увеличение массогабаритных параметров, ухудшение энергетических характеристик и возможное возникновение искажений сигнала из-за использования двух различных источников для создания и возбуждения плазмы. Данная конструкция получила большое распространение, многие научные группы исследовали работу и характеристики ПНВА аналогичной конструкции и различные её модификации.

1.3.4. ПНВА с плазмой, создаваемой и возбуждаемой от одного передатчика через коаксиальный тройник

Конструкция, представленная на рисунке 1.16, была предложена в работе [52]. Конструкция представляет собой несимметричную вибраторную антенну со стеклянной газоразрядной трубкой, металлическим экраном и соединением коаксиального тройника и генератора.

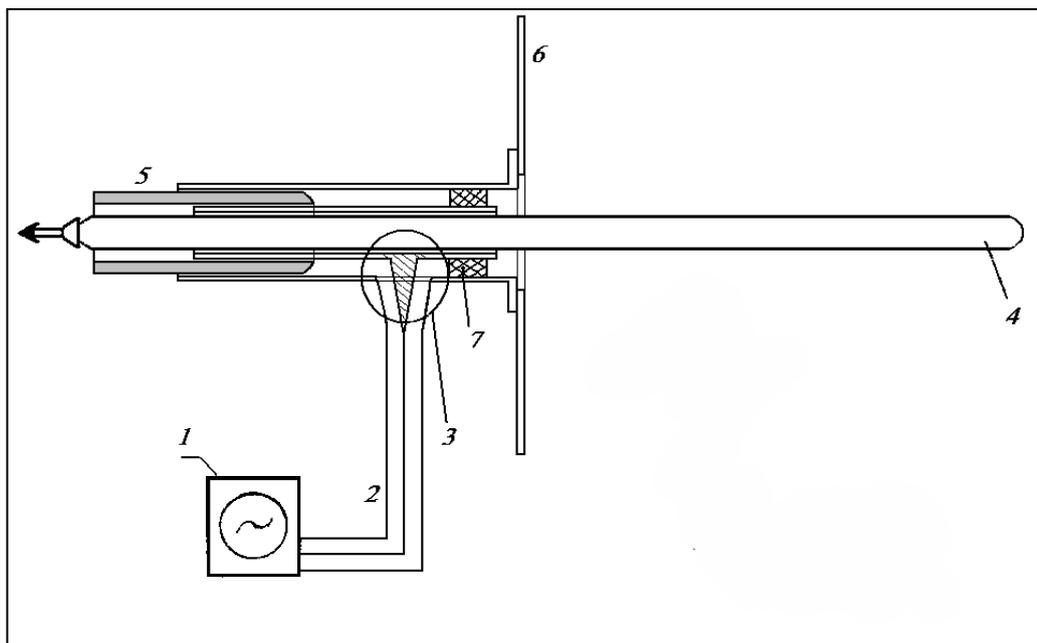


Рисунок 1.16 – Схема ПНВА с коаксиальным тройником в фидерном тракте [52]: 1 – ВЧ-генератор, 2 – кабель, 3 – тройник, 4 – кварцевая трубка, 5 – подвижный поршень, 6 – алюминиевый диск, 7 – тефлоновая шайба.

Электромагнитная волна от ВЧ-генератора 1 по коаксиальному кабелю 2 поступает в коаксиальный тройник 3 и через него поступает на диэлектрическую трубку 4, где возбуждается поверхностная электромагнитная волна, происходит ионизация газа и формирование плазмы. Плазма в трубке 4 и алюминиевый диск 6 образуют ПНВА. Подвижный поршень 5 необходим для регулировки длины антенны.

Относительные затраты спектральной плотности мощности источника ВЧ колебаний на создание эффективного ПНВА оказываются невелики, и это позволяет осуществлять передачу сигналов через плазменную антенну, возбуждаемую мощностью самой передающей ВЧ станции в несколько десятков Ватт.

На рисунке 1.17 видно, что распределение поля, хотя и искажено влиянием ближнего поля антенны, тем не менее, имеет максимум поля в конце антенны, как и для случая металлической антенны.

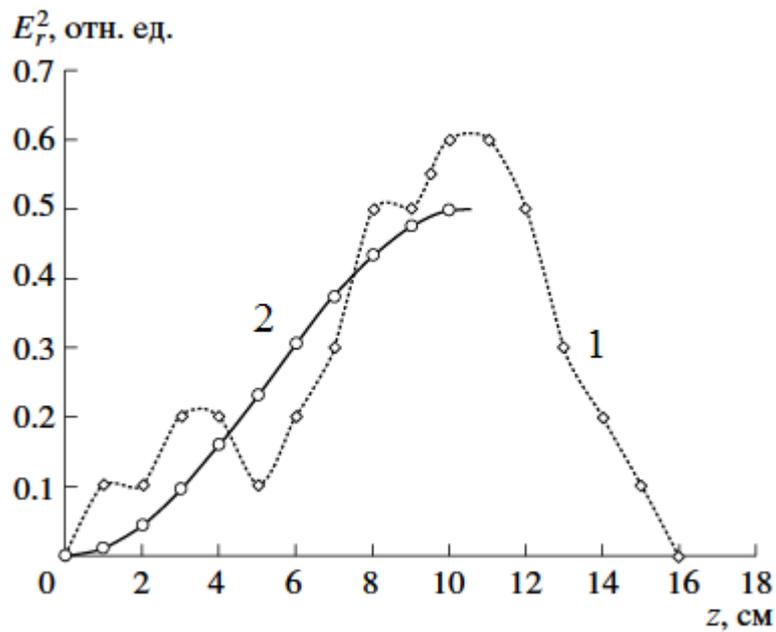


Рисунок 1.17 - Аксиальное распределение E_r^2 составляющей поля плазменного несимметричного вибратора вдоль оси z : 1 – измерение, 2 – теоретическая зависимость [52].

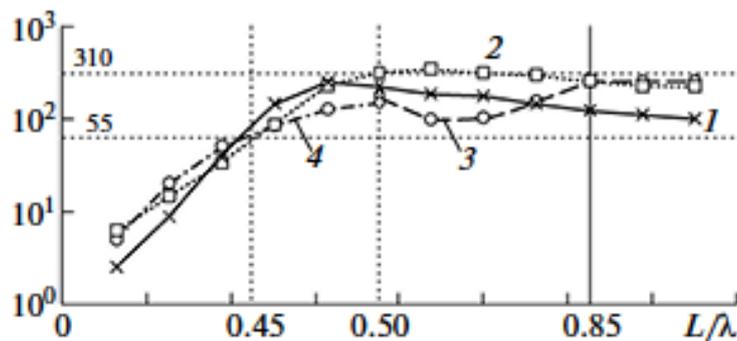


Рисунок 1.18 - Зависимость спектральной плотности мощности излучения металлической и плазменной антенн от отношения L/λ : 1 –

металлический вибратор, эксперимент; 2 – плазменный вибратор, эксперимент; 3 – металлический вибратор; 4 – металлический вибратор $\lambda_{\text{возб}} > \lambda_{\text{прием}}$ [53].

В [53, 56] показано, что плазменная несимметричная вибраторная антенна такой конструкции может быть приёмной и передающей антенной. Однако эффективность такой антенны уступает аналогичной металлической несимметричной вибраторной антенне.

К достоинствам данной конструкции следует отнести:

- простоту реализации;
- надёжность;
- удобство в использовании.

Недостатками такой конструкции являются:

- потери из-за отражений при использовании ввода ВЧ волны через коаксиальный тройник;
- нелинейные искажения при прохождении сигнала через плазму.

1.3.5. Плазменная антенна с индуктивной связью с генератором

В работе [92] предложена конструкция ПНВА с индуктивной связью с генератором через микрополосковую линию. Это конструкция (схема на рисунке 1.19) использовалась для исследования характеристик разряда плазменной антенны.

Возбуждение и поддержание плазменного столба осуществляется излучением передатчика на открытом конце коаксиального кабеля, соединенного через элемент связи с диэлектрической трубкой диаметром 20 мм, заполненной газом. Плазма создавалась в аргоне при давлении 1–3 торр (130 – 400 Па).

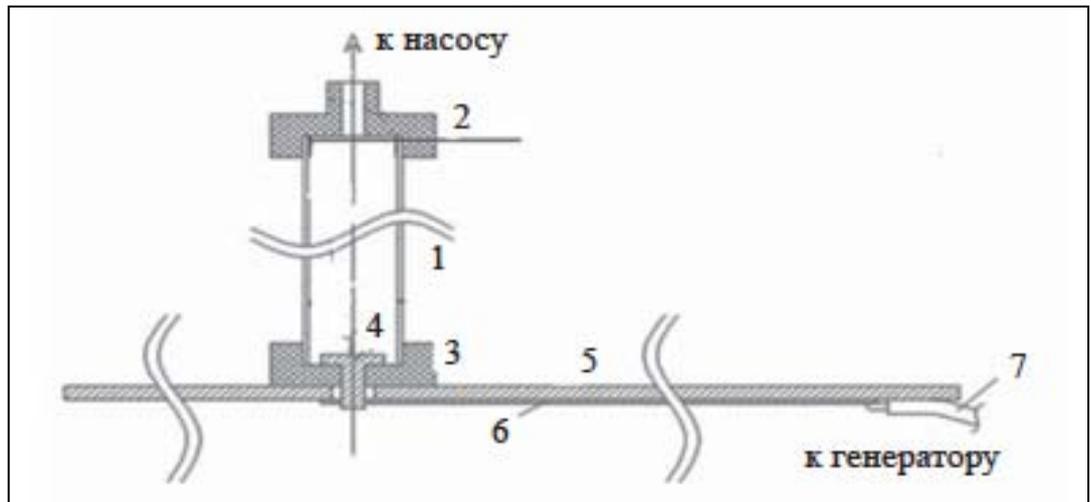


Рисунок 1.19 – Схема экспериментальной установки для исследования характеристик разряда плазменной антенны: 1 – кварцевая трубка; 2, 3 – диэлектрическая пробка; 4 – электрод; 5 – металлическое основание; 6 – согласующая линия; 7 – генератор[92].

В работе [92] исследуются только характеристики разряда и плазмы антенны, характеристики самой антенны (диаграмма направленности, излучаемая мощность и т.д.) не исследовались. Но в работе [93] Приведены результаты исследований спектральных характеристик вибраторных плазменных антенн. Показано, что в спектре излучаемого плазменной антенной сигнала есть вторая и третья гармоники несущей частоты сигнала, что отличает ПНВА от аналогичной металлической антенны.

Такая схема не обладает существенными достоинствами по сравнению с ранее рассмотренными схемами. К недостаткам данной схемы можно отнести наличие электрода в плазме и нескольких промежуточных преобразований волны в местах соединения коаксиального кабеля и электрода с микрополосковой линией. Такое конструктивное решение приведёт к дополнительным потерям и искажениям сигнала.

1.3.6. Плазменная несимметричная вибраторная антенна с ёмкостной связью с передатчиком

Характеристики плазменной антенны с возбуждением поверхностной волной через ёмкостную связь с передатчиком рассматриваются в работе [59]. На рисунке 1.20 приведена схема антенны с узлами возбуждения и приёма-передачи сигнала. Для этого используется возбуждение на частоте 450 МГц с помощью поверхностной электромагнитной волны с уровнями спектральной плотности мощности радиочастот до 40 Вт и давлением газа в трубке от 0,25 до 0,6 мБар. Для создания плазмы и возбуждения антенны используется генератор импульсов на частоте 450 МГц, сигнал с которого через УМ и согласующую измерительную цепь проходит на медную муфту, обёрнутую вокруг диэлектрической трубки. Муфта представляет собой возбудитель поверхностной электромагнитной волны на антенне и ёмкостным согласующим устройством. Таким образом ионизируется плазма и излучается сигнал на частоте 450 МГц. Для приёма или передачи сигнала на других частотах используется приёмно-передающий узел, состоящий из режекторного фильтра и приёмника (анализатора спектра) или передатчика.

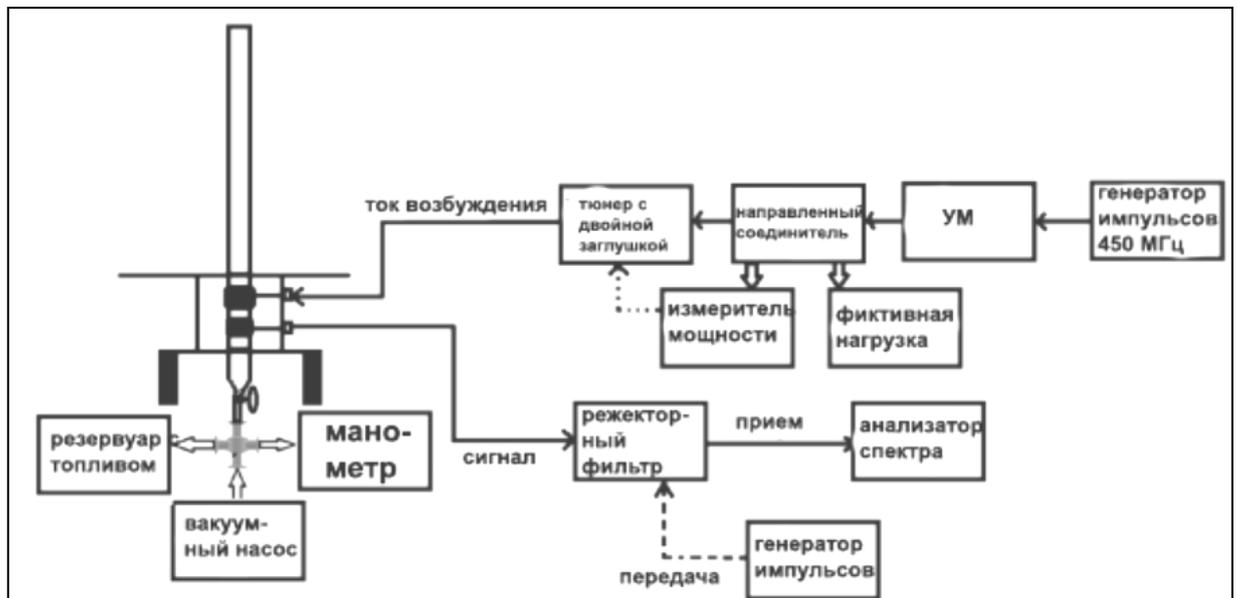


Рисунок 1.20 – Структурная схема антенны с поверхностной волной [59].

В цитируемой работе проводились исследования КСВН антенны в зависимости от спектральной плотности мощности возбуждения.

Результаты исследования показали, что уменьшение спектральной плотности мощности возбуждения и увеличение давления приводят к уменьшению резонансной длины антенны. Коэффициент усиления плазменной антенны был измерен между 110 и 300 МГц. Результаты показывают, что усиление плазменной антенны значительно меньше, чем у обычной металлической несимметричной вибраторной антенны.

Достоинством данной конструкции является возможность управление резонансной длиной антенны. Существенным недостатком данной антенны является низкий коэффициент усиления по сравнению с аналогичной металлической антенной.

1.3.7. Плазменная несимметричная вибраторная антенна с коаксиальным вводом сигнала

В диссертационной работе исследовалась конструкция ПНВА наиболее близкая к конструкции МНВА с питанием от коаксиального кабеля. Прототипом для конструкции плазменной несимметричной вибраторной антенны с коаксиальным вводом сигнала (рисунок 1.21) послужила ранее рассмотренная конструкция ПНВА с коаксиальным тройником [52,53,56].

Конструкция исследуемой ПНВА состоит из коаксиального кабеля 1, газоразрядной трубки с плазмой 2, один конец которой помещен в расширение коаксиального кабеля и зафиксирован с помощью диэлектрической вставки, и металлического экрана в форме диска 3. Внутренний проводник коаксиального кабеля проводами соединен с контактами электродов газоразрядной трубки. Внешний проводник соединён непосредственно с металлическим экраном. Достоинствами такой конструкции является её простота, близость к конструкции аналогичной металлической антенны. Такая конструкция также позволяет использовать один источник ВЧ или СВЧ колебаний для создания плазмы и для передачи сигнала. Мощности передающей ВЧ или СВЧ станции в несколько десятков

Ватт (~ 40 Вт) достаточно, чтобы осуществлять передачу сигналов с помощью плазменной несимметричной вибраторной антенны длиной $l \approx \lambda_0/4$, где λ_0 – длина электромагнитной волны в свободном пространстве. В качестве газоразрядной трубки используется люминесцентная лампа низкого давления со смесью аргона (давление $p_a \approx 130 - 400$ Па $\approx 1 - 3$ торр) и паров ртути (давление $p_{рт} = 0,13 - 1,3$ Па = $10^{-3} - 10^{-2}$ торр).

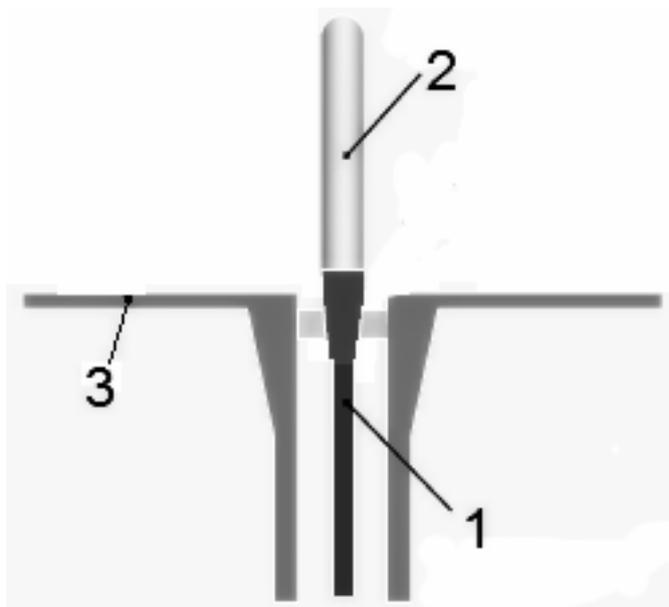


Рисунок 1.21. Плазменная несимметричная вибраторная антенна с питанием от коаксиального кабеля: 1 – коаксиальный кабель, 2 – газоразрядная трубка с плазмой, 3 – металлический экран.

1.3.8. Особенности плазменных несимметричных вибраторных антенн

Плазменная несимметричная вибраторная антенна из газоразрядной трубки имеет ряд особенностей существенно отличающих её от металлической несимметричной вибраторной антенны. Выше были рассмотрены конструктивные особенности соединения ПНВА и фидерного тракта. В конструкциях плазменных антенн учитывается и способ генерации плазмы необходимой концентрации. Из работ [41-47, 50-54, 59-61] можно выделить несколько основных способов генерации плазмы,

которые широко применяются в плазменных антеннах из газоразрядных трубок:

- Ионизация постоянным током высокого напряжения;
- Ионизация полем волны СНЧ и ОНЧ диапазонов (5–20 кГц);
- Ионизация полем ВЧ и СВЧ волны.

От способа ионизации зависят параметры плазмы (величина и распределение концентрации в трубке), конструкция, возможность управления характеристиками антенны. Способы обеспечения конструктивной прочности плазменных антенн описаны и изучены в [93].

Управление характеристиками плазменной антенны из газоразрядной трубки осуществляется за счёт изменения параметров плазмы, в первую очередь, электронной концентрации n_e . В работах [51-55,94,95] была получена нелинейная зависимость излучаемой мощности, коэффициента усиления и других параметров плазменной несимметричной вибраторной антенны от концентрации плазмы n_e . Некоторые из этих зависимостей приведены на рисунке 1.22, на всех приведенных графиках можно выделить три участка: линейный рост, нелинейный изгиб и выход на плато. Кроме того, на рисунке 1.22а виден участок медленного роста излучаемой мощности при концентрациях до 10^{11} см^{-3} . Важно учитывать нелинейные зависимости для изучения физических процессов в ПНВА и управления характеристиками антенны.

Кроме нелинейной зависимости параметров ПНВА в [96,97] были экспериментально обнаружены нелинейные искажения сигнала, излучаемого плазменными антеннами. Для случая плазменной антенны с индуктивной связью с генератором, где плазма создается с помощью излучения ВЧ передатчика (см. 1.3.5), и для случая антенны с плазмой, создаваемой разрядом от источника ОНЧ диапазона, обнаруженные искажения представляли усиление кратных гармоник несущей частоты. Подробный анализ обнаруженных нелинейных искажений не проводился.

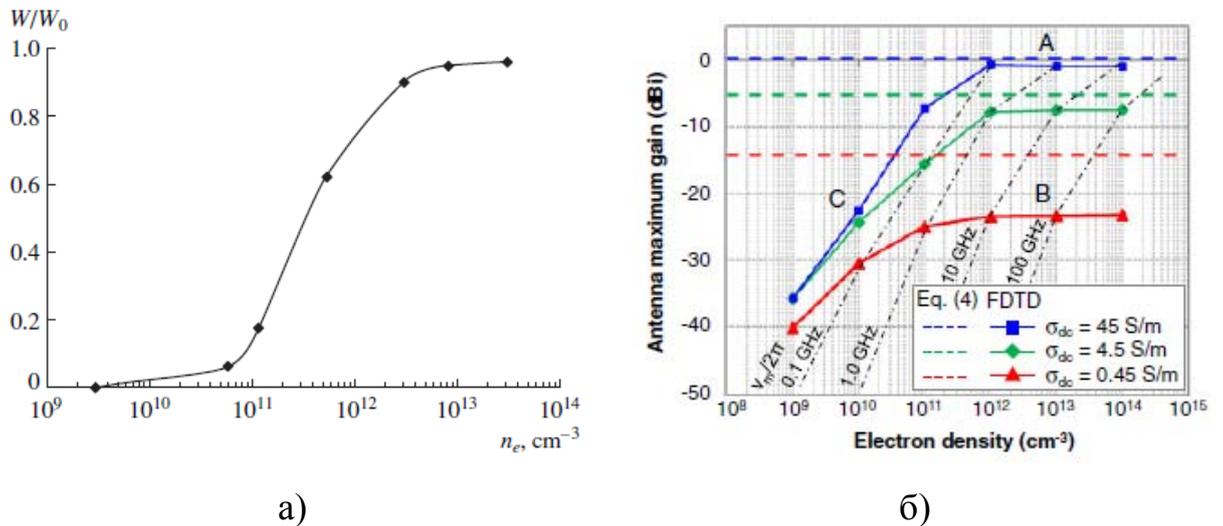


Рисунок 1.22. Зависимость излучаемой мощности ПНВА (а) [53] и коэффициента усиления (б) [94] от концентрации плазмы n_e .

Выводы по главе 1

В данной главе проведён обзор литературы по плазменным технологиям в антенной технике. В рамках обзора подробно представлены особенности наиболее распространённого класса плазменных антенн – антенны из газоразрядных трубок. Основное внимание уделяется описанию особенностям работы, конструкции и характеристикам плазменной несимметричной антенны. На основе анализа конструкций плазменных несимметричных вибраторных антенн была предложена плазменная антенна с прямым вводом излучения от коаксиального кабеля, которая исследовалась в данной работе. Описаны некоторые особенности работы ПНВА связанные с нелинейной зависимостью её характеристик от концентрации плазмы и нелинейными искажениями излучаемого антенной сигнала, которые подробно исследовались в данной диссертации.

Глава 2. Выбор численной модели плазменной антенны и описание экспериментальных стендов для измерения характеристик антенн

В данной главе представлен анализ численных и экспериментальных методов исследования антенн, программных комплексов для численного моделирования устройств СВЧ и антенн, численных моделей плазмы. Кроме того, в главе дано описание созданных численных моделей плазменной и аналогичной металлической антенны, методика и схема проведения экспериментальных измерений диаграмм направленности и спектров излучаемого антенной сигнала.

2.1 Численные методы и программные комплексы, используемые при моделировании антенно-фидерных устройств

2.1.1 Методы моделирования антенно-фидерных устройств и распространения электромагнитных волн в сложных средах

В последнее время стало появляться много различных программных продуктов, ориентированных на решение задач, связанных с моделированием антенно-фидерных устройств и распространением электромагнитных волн в сложных средах. Среди алгоритмов, используемых для решения электродинамических задач, следует отметить [98,99]:

- Прямые методы решения граничных задач, такие как метод конечных элементов (МКЭ) (в англоязычной литературе – Final Element Method (FEM)) и метод конечных разностей во временной области (МКРВО) (Finite Difference Time Domain (FDTD)).
- Косвенные методы, такие как метод моментов (ММ) (Method of Moments, MoM) или интегральный метод (метод интегрального уравнения).

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения задач электродинамики и моделирование устройств СВЧ. Метод основан на разбиении всего объема расчетной области на тетраэдры различной формы и размера, и вычисления уравнений Максвелла в частотной области. С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется на совокупности функций. МКЭ универсален для моделирования устройств СВЧ и электродинамических сред с постоянными во времени параметрами, но не подходит для устройств и сред с изменяющимися во времени параметрами.

Метод конечных разностей во временной области (МКРВО, FDTD) — это метод численного решения задач электродинамики, основанный на дискретизации уравнений Максвелла во времени и пространстве. Метод работает во временной области, поэтому он годится для решения задач в широком диапазоне частот и моделирования устройств и сред с изменяющимися во времени параметрами. МКРВО сразу возвращает значения векторов E и H , знание которых необходимо для решения большинства задач на электромагнитную совместимость/электромагнитное взаимодействие, что очень удобно, так как оказывается ненужным промежуточное преобразование результатов моделирования.

Данные методы обладают достаточной универсальностью, то есть возможность анализировать практически любую электродинамическую структуру, но с большими тратами компьютерных ресурсов необходимых для анализа СВЧ-структур. Причина универсальности МКЭ и МКРВО объясняется дискретизацией пространства, лежащей в основе этих методов. Количество элементов разбиения определяет масштабность решаемой задачи и в методах МКЭ и МКРВО.

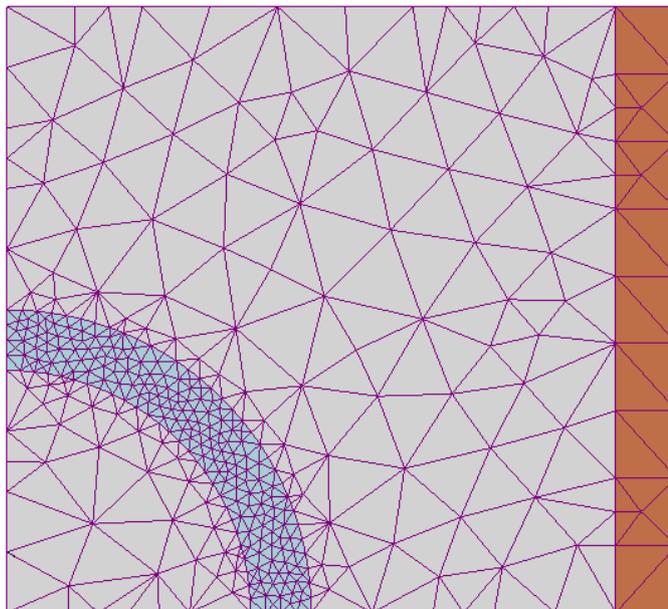


Рисунок 2.1. Разбиение на конечные элементы [99].

Метод моментов (МоМ) применяется при решении задач, в которых присутствуют токи в металлических или диэлектрических структурах и излучение в свободное пространство. Эти структуры должны быть электрически малыми и обычно являются металлическими, однако специальные расширения метода допускают наличие диэлектриков в виде покрытий или объемных элементов конечных размеров. Метод моментов выполняет решение уравнений Максвелла в интегральной форме в частотной области. Достоинство метода моментов заключается в том, что он является «методом источника», т.е. дискретизируется только интересующая структура, а не свободное пространство, как при решении уравнений для нахождения поля в объеме. При этом граничные условия не требуются, а используемая память пропорциональна геометрии задачи и частоте. Недостаток метода моментов является продолжением его достоинств и выражается в ограниченности решаемых задач.

2.1.2. Программы EMPro и КАРАТ

В современной практике численного моделирования антенно-фидерных устройств можно выделить три основных типа используемых программных комплексов: программы с открытым кодом, коммерческие системы автоматизированного проектирования (САПР) и моделирования,

специализированные или универсальные программы (коды) для моделирования электродинамических процессов.

Программы с открытым кодом в связи с ограниченностью их функционала не подходят для исследования таких сложных объектов как плазменная антенна. В этом разделе рассмотрены типичные представители программных комплексов в которых реализованы метод конечных элементов и метод конечных разностей во временной области САПР EMPro и электродинамический код КАРАТ.

EMPro

EMPro (Electro-Magnetic Professional) [100] — САПР для моделирования трёхмерных СВЧ-устройств и антенн, процессов распространения электромагнитных волн, разработанная компанией Agilent Technologies (сейчас Keysight Technologies).

В САПР EMPro базовыми являются сразу два метода: метод конечных элементов и метод конечных разностей во временной области. Такой подход дает пользователю возможность выбирать наиболее эффективное решение для своей задачи с точки зрения соотношения точности моделирования и затрат времени на расчет. Кроме того, для ускорения расчета при анализе СВЧ структур в диапазоне частот применен метод быстрого периодического изменения частоты (сweeping по частоте) (БСЧ) (Fast Frequency Sweep - FFS). Этот метод позволяет значительно сократить время моделирования по сравнению с обычным методом последовательного перебора частотных точек. Метод БСЧ позволяет экстраполировать частотную характеристику структуры в широком диапазоне частот на основании ее значения всего на одной частоте в силу аналитической природы линейных электромагнитных задач. Метод БСЧ вычисляет передаточную функцию схемы и ее производные по частоте, причем порядок дифференцирования определяется пользователем (не более 12). Передаточная функция, а также ее производные используются для вычисления доминирующего полюса и нуля передаточной функции

вблизи частот анализа. Тем самым для относительно простых структур, размеры которых меньше длины волны, обеспечивается точная экстраполяция частотной характеристики в широкой полосе частот.

Основные отличия EMPro:

- 3D-среда электромагнитного анализа ВЧ устройств, корпусов, антенн и т.д. совместно с объектами, на которые они установлены (машины, корабли, самолеты и т.п.);
- использования МКЭ, метода собственных частот (Eigen mode Solver) и МКРВО;
- удобные графические средства для быстрого создания произвольных объемных структур с помощью современного простого в использовании интерфейса (встроенный трехмерный конструкторский графический редактор);
- полная совместимость с другими САПР Keysight Technologies (ADS, IC-САРи др.) — прямой импорт/экспорт файлов для совместного моделирования; устройство может быть параметризовано в EMPro, для импорта и параметрической оптимизации в ADS;
- Простой импорт CAD файлов из других программ: SAT, SAB, STEP, IGES, ProE, VDAFS(.vda), Inventor(.ipt, .iam), SolidWorks (.sldprt, .sldasm), VariPosa (.mmf), DXF, ODB++;
- проверка на соответствие стандартам по ЭМ совместимости;
- расширенные возможности по созданию скриптов на языке Python для автоматизации моделирования и совершенствования обработки результатов;
- возбуждение волны и питание устройств производится различными способами: установкой настраиваемых источников напряжения и тока и настраиваемой нагрузки на моделируемый объект, использованием внешней плоской волны и гауссова пучка при моделировании МКРВО, установкой и настройкой волноводных портов для моделирования методом МКЭ;

- с помощью сенсоров можно обнаружить напряжения, токи и величину поля в ближней и дальней волновых зонах;
- доступны прямые и итеративные решатели, есть возможность организации многопоточных вычислений на многоядерном центральном процессоре и карте(-ах) графического процессора;
- представление в виде трехмерных и двумерных графиков, картин распределения силовых линий поля, анимированной картины распространения поля или прохождения сигнала, а также сохранение в виде текстовых данных;
- результаты моделирования проекта могут быть сохранены в виде данных и представлены в графическом виде совместно с данными из других проектов, как во встроенном графопостроителе, так и в стороннем;
- для нахождения мелких разрывов между проводниками в проекте может использоваться функция проверки связи.

КАРАТ

Код КАРАТ [101-103] – универсальный электродинамический код, предназначенный для решения стационарных и нестационарных электродинамических задач, имеющих сложную геометрию и/или включающих взаимодействие электромагнитных волн и плазмы или частиц (электронов, ионов, нейтралов). Уравнения Максвелла в коде КАРАТ решаются с использованием метода конечных разностей во временной области [101-103]. Код КАРАТ был разработан В.П. Таракановым и впервые представлен в 1990—1992 годах на семинарах и конференциях. Данный код стал первым универсальным электромагнитным кодом для решения широкого класса электродинамических задач. До настоящего момента код КАРАТ непрерывно дорабатывается для решения возникающих в среде пользователей задач. Первоначально написанный на языке Fortran 77, код модернизирован до уровня языка Fortran 90 и 95. Код КАРАТ показал высокую эффективность в моделировании электронных приборов типа

лампы обратной волны (ЛОВ), виркаторов, лазеров на свободных электронах, пучково-плазменного разряда и т. п., при моделировании элементов задачи электромагнитного подавления, включая описание источника СВЧ излучения, распространения и взаимодействия излучения с облучаемым объектом. Код пригоден для моделирования устройств с электронными и ионными пучками, лазерно-плазменного взаимодействия. Плазма может моделироваться с помощью нескольких моделей.

Основные особенности кода КАРАТ:

- Материальные уравнения сред представлены различными моделями — как феноменологическими (модель идеального проводника, модель Друде, модель Джорджевича и др.), так и в представлении методом «частица в ячейке» (Particle-in-Cell (PIC));
- Графический интерфейс кода позволяет быстро и точно описывать задачи, характерные для разделов физики плазмы и физики пучков заряженных частиц, в том числе, с большими токами, для разработки генераторов электромагнитного излучения, конструирования технологических установок.
- Результаты моделирования доступны пользователю в виде разнообразных графиков непосредственно после завершения расчета и во время его.
- Имеются три составные части кода, обрабатывающие, соответственно, одномерные, двумерные и трехмерные задачи (далее по тексту 1D, 2D, 3D от англ. 1-, 2-, 3-dimensional). Во всех трех случаях учитываются все три компоненты электромагнитных полей и компонент импульсов частиц. 2D часть моделируется в плоской (x, z) , полярной (r, θ) и осесимметричной (r, z) геометриях. 3D часть — в декартовой (x, y, z) и цилиндрической (r, θ, z) геометриях. Код может

выполнять моделирование в электромагнитном или потенциальном приближениях.

- Для решения уравнений Максвелла применяется разностная схема с перешагиванием на прямоугольных сетках со сдвигом. Конкретная реализация схемы, примененная в коде, обладает свойством точного описания граничных условий на поверхностях расчетной области.
- Большое разнообразие методов описания границ и элементов расчетной области позволяет описывать различные элементы исследуемых устройств и задач: от источников, описываемых сосредоточенными параметрами в виде RLC цепочек до фольг, находящихся под определенными потенциалами, в том числе, с поглощением частиц.
- Внешнее магнитное поле задается несколькими способами, а именно, описанием магнитных катушек, заданием величины поля на оси системы, а также прямым заданием поля в области.
- Квазистатическое электрическое поле задается путем задания потенциалов на граничных электродах с последующим решением уравнения Лапласа в объеме.
- Основные параметры макрочастиц, а именно, заряд, масса, коэффициент укрупнения, задаются в соответствующем меню. В коде оценивается возможное число частиц, которые будут использованы в моделировании пучков и/или плазменных образований.
- Начальное положение частиц плазмы задается в меню положением областей с плазмой постоянной и/или переменной в пространстве плотности. Угловое и энергетическое распределения инжектируемых частиц задается специальными таблицами.

- Требования, предъявляемые кодом к вычислительным ресурсам, не жестче, чем у других сходных вычислительных кодов. Минимально достаточным является использование персонального компьютера с оперативной памятью не менее 1 ГБ и с объемом дискового пространства не менее 5 ГБ.
- В минимальной конфигурации код позволяет использовать в 2D сетку размером порядка 500×5000 узлов и в 3D соответственно $151 \times 151 \times 1001$ узлов, и более 106 частиц. Расчет, в зависимости от точности, подробности и размеров задачи, может занимать от нескольких минут до десятков часов.
- Для запуска кода в стандартной комплектации необходима операционная система Windows (торговая марка MicrosoftCorp.). Есть опыт использования кода под другими операционными системами, в том числе под Linux.
- Во всех трех вариантах кода (1D, 2D, 3D) для задания начальных и граничных условий используется общий графический интерфейс (написанный на языке C++), поэтому моделирование при меньшей размерности может использоваться при постановке задач большей размерности.
- Все результаты представляются в виде единообразных таблиц, плоских и объемных графиков для «мгновенных снимков» (англ. snapshot) и «историй» (временных зависимостей). Постпроцессор позволяет получать файлы в виде, пригодном для печати, а также в виде числовых таблиц для обработки любыми программами построения графиков.

Код КАРАТ тестировался различными независимыми исследовательскими группами путем сравнения результатов моделирования и аналитических решений, а также успешно применялся при моделировании различных физических задач, в том числе ламп обратной волны, виркаторов, пучково-плазменного разряда и т. д.

Результаты имеют разумное согласие с результатами реальных экспериментов [101-103].

2.2. Экспериментальные стенды для исследования диаграммы направленности и спектра излучаемого сигнала антенн

В рамках выполнения диссертационной работы для проведения экспериментальных измерений диаграмм направленности (ДН) и спектральных характеристик (спектров) излучаемого сигнала металлической и плазменной несимметричных вибраторных антенн были собраны стенды. Разработка, выбор оборудования и сборка измерительных стендов проводились по методике для антенных измерений [104-106] с учётом требований к точности измерений, выполнения условий дальней волновой зоны и наличия оборудования. Для проведения экспериментальных измерений использовались два стенда: для измерения диаграммы направленности МНВА и универсальный стенд для измерения диаграмм направленности и спектров излучаемого сигнала МНВА и ПНВА.

Для выбора программного комплекса для моделирования антенн было решено провести сравнение результатов расчёта диаграмм направленности металлической несимметричной вибраторной антенны в САПР EMPro и в коде КАРАТ с результатами экспериментального измерения. В эксперименте была применена теорема взаимности, согласно которой одна и та же антенна имеет идентичные характеристики для передачи и приёма сигнала. В эксперименте теорема взаимности позволила использовать в качестве излучающей антенны рупор, а металлическая четвертьволновая вибраторная антенна была использована в качестве приемной антенны.

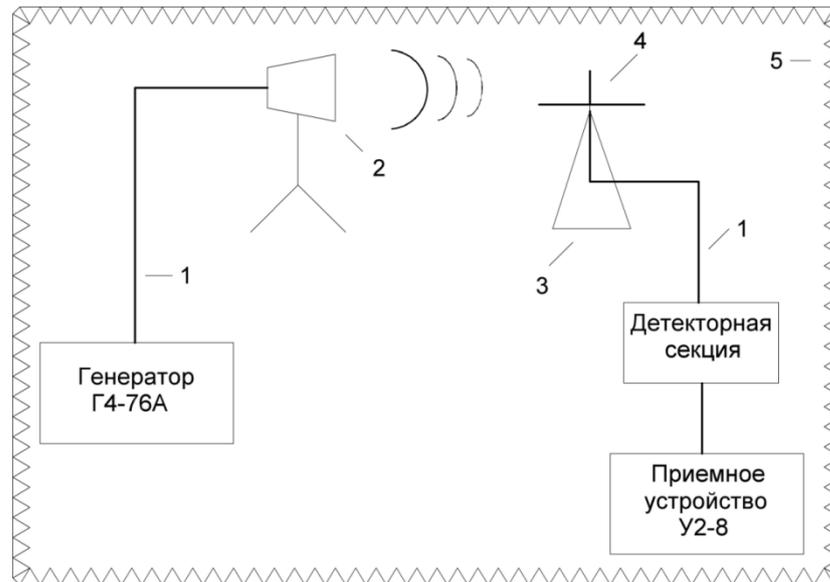


Рисунок. 2.2. Схема стенда для измерения диаграммы направленности металлической несимметричной вибраторной антенны: 1 – коаксиальный кабель, 2 – рупорно-линзовая измерительная антенна П6-23М, 3 – поворотное устройство, 4 – металлический несимметричный вибратор, 5 – поглощающие элементы безэховой камеры.

Генератор Г4-76А генерировал последовательность радиоимпульсов с несущей частотой 1,7 ГГц. Сигнал поступал по коаксиальному кабелю 1 на излучающую рупорную антенну 2. Рупорная антенна 2 излучает сигнал в направлении металлического несимметричного вибратора 4, который располагается на поворотном устройстве 3. Антенна установлена таким образом, что поворотное устройство позволяет вращать её в Е-плоскости (угломестной плоскости) на 360° . Сигнал, принимаемый металлическим несимметричным вибратором 4, по коаксиальному кабелю 1 через детекторную секцию поступает на приемное устройство усилитель У2-8, который фиксирует значение напряжения. Данные записывались с интервалом вращения поворотного устройства в 10° .

1. Схема измерения спектральных характеристик антенн представлена на рисунке 2.3.

2. Расстояние R между измеряемой и вспомогательной антеннами было выбрано равным 5 метрам, с учетом дальней зоны: $R \geq 10 \cdot 0,30 \text{ м} = 3 \text{ м}$.

3. Подобраны измерительные приборы согласно разработанной схеме.
4. Места для установки антенн выбирались с учетом уменьшения паразитных отражений. Установить антенны и аппаратуру на рассчитанном расстоянии, а поворотный стол установить на то значение, где диаграмма направленности максимальна, к соответствующей антенне. Поворотный стол был установлен так, чтобы диаграмма направленности антенны имело максимальное значение.
5. Определить уровень собственных шумов анализатора спектра, фоновые шумы и спектральные характеристики измерительной установки.
6. Измерение спектра исследуемых антенн ПНВА и МНВА (с длиной 29 см). В зависимости от измерения подключался аттенюатор.

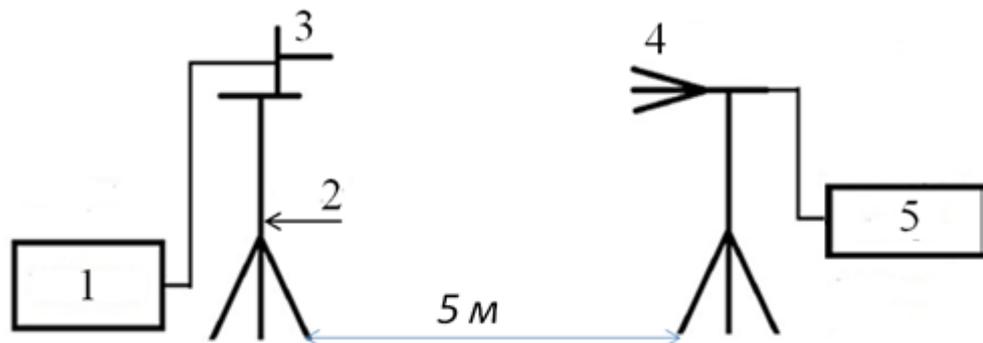


Рисунок 2.3. Схема стенда для измерения диаграммы направленности и спектральных характеристик плазменной и металлической несимметричных вибраторных антенн: 1- передающая радиостанция VX2100, 2- поворотное устройство, 3- исследуемая антенна, 4-измерительная антенна, 5- анализатор сигналов (спектра) Keysight Technologies PXA N9030A.

Измерения на стенде проводились следующим образом: сигнал от передающей радиостанции 1 VX-2100, поступал на измеряемую антенну (ПНВА или МНВА) 2, расположенную на поворотном устройстве 3, исследуемая антенна излучает сигнал, принимаемый измерительной антенной 4, принимаемый сигнал от антенны проходит на анализатор

сигналов *b* (спектра) РХА N9030A. либо напрямую, либо через аттенюатор *5* (который подключался в зависимости от проводимого исследования).

Основные параметры анализатора спектра Agilent РХА N9030A для проводимых измерений представлены в таблице 2.1 [107]. Были измерены собственные шумы анализатора спектра (рисунок 2.3), результаты представлены на рисунке 2.3. Уровень собственных шумов анализатора Agilent РХА N9030A – -100 дБм.

Таблица 2.1. Основные параметры анализатора спектра
Agilent РХА N9030A

Суммарная абсолютная погрешность измерения уровня	на частоте 50 МГц $\pm 0,24$ дБ на всех частотах $\pm (0,24 + \text{неравномерность АЧХ})$ от 10 Гц до 3,6 ГГц $\pm 0,19$ дБ
Погрешность полосы пропускания Диапазон полос пропускания (поспектральной плотности мощности)	от 1 Гц до 100 кГц $\pm 0,5\%$ ($\pm 0,022$ дБ) от 110 кГц до 1,0 МГц $\pm 1,0\%$ ($\pm 0,044$ дБ) от 1,1 до 2,0 МГц $\pm 0,07$ дБ, номинально от 2,2 до 3 МГц $\pm 0,10$ дБ, номинально от 4 до 8 МГц $\pm 0,20$ дБ, номинально

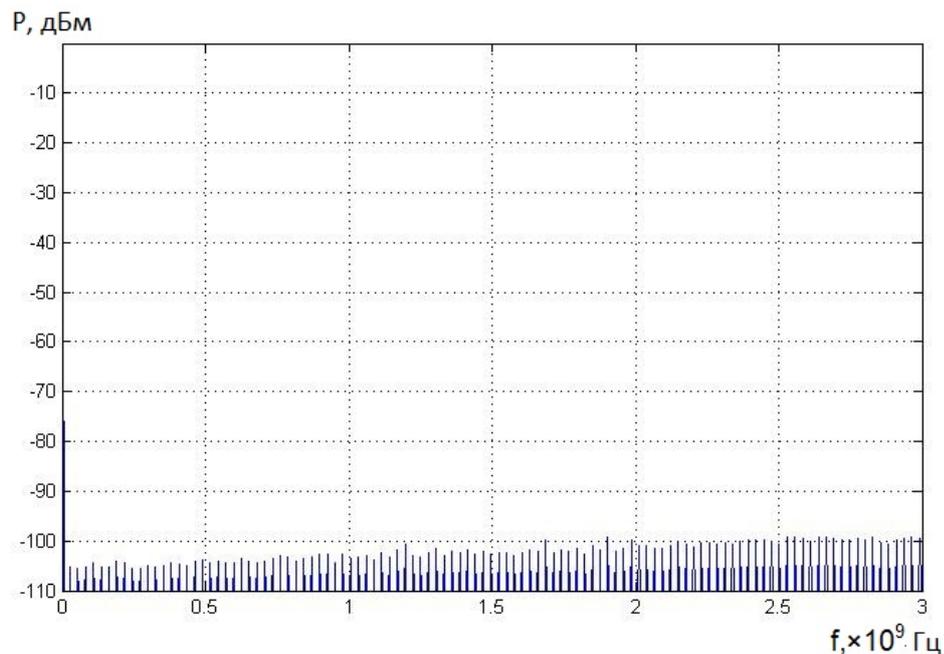


Рисунок 2.3. Уровень собственных шумов анализатора спектра
Agilent PXA N 9030A.

Зависимость комплексного коэффициента передачи аттенюатора представлена на рисунке 2.4, а значения коэффициента передачи на рабочей частоте и частотах кратной ей гармоник представлены в таблице 2.2.

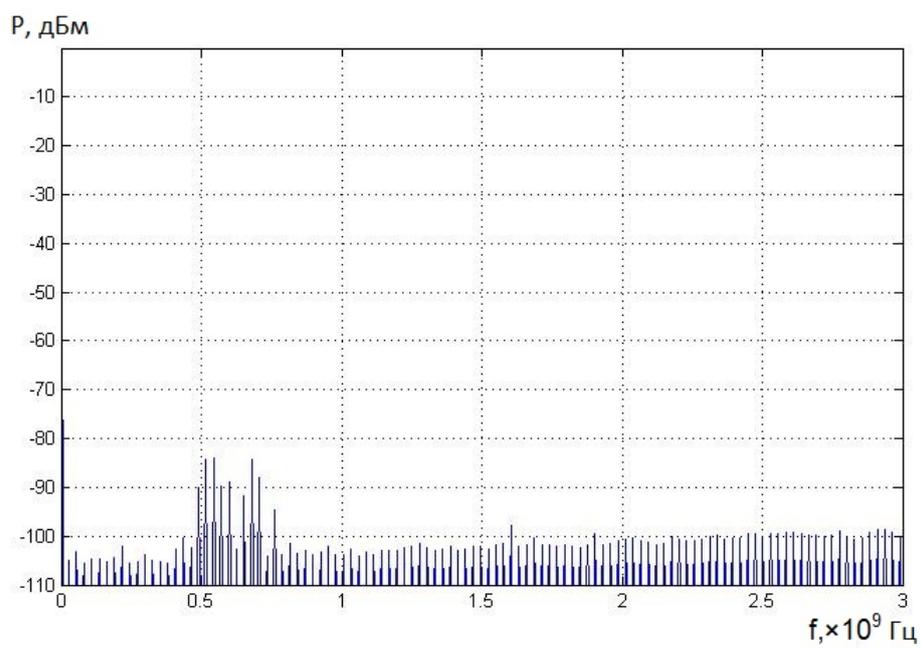


Рисунок 2.4. Коэффициент передачи от входа к выходу аттенюатора.

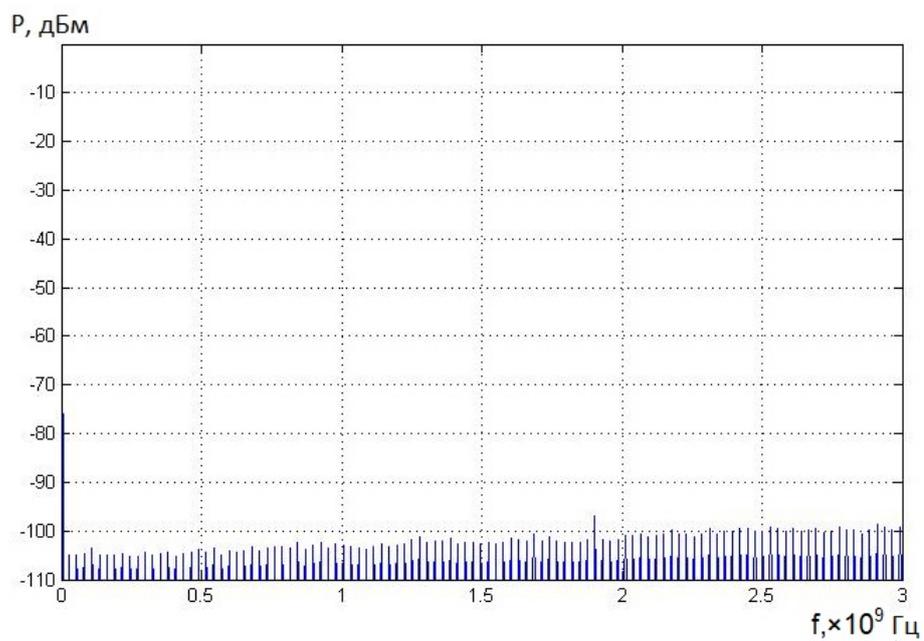
Таблица 2.2. Значения коэффициента передачи от входа к выходу
аттенюатора

f , МГц	S21, дБ
445	-40,18
895	-34,33
1338	-30,06
1781	-26,28

Фоновые шумы измерительной установки в безэховой камере представлены на рисунке 2.5.



а)



б)

Рисунок 2.5. Фонový шум в безэховой камере: а) без подключенного аттенюатора б) с подключенным аттенюатором

Результаты были получены на диапазоне частот 3 Гц – 3 ГГц в безэховой камере. Как видно из рисунка 2.5а, фоновый шум незначительный на всей полосе частот, кроме области телевизионных частот, возникающие в силу недостаточной изоляции безэховой камеры от внешних сигналов. Подключенный аттенюатор дает нам подавление приёма фоновых сигналов на частотах телевизионных каналов, что видно на рисунке 2.5б.

2.3. Выбор и описание численных моделей плазменной антенны

В этом параграфе продемонстрирована допустимость использования электромагнитного кода КАРАТ для моделирования диаграммы направленности вибраторных антенн. В 2.3.1 дано описание численных моделей плазменной несимметричной вибраторной антенны, где плазма представлена с помощью модели Друде, а в 2.3.2 плазма представлена с использованием метода «частица в ячейке» (Particle-in-Cell, PIC).

2.3.1 Сравнение результатов моделирования диаграммы направленности металлической антенны с экспериментальными измерениями

В данном разделе исследовалась ДН для металлического несимметричного вибратора с $l_{ант} = 4,1$; $d_{ант} = 0,3$ см и $D_{экp} = 18$ см на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц в дальней зоне, как численно в программах код КАРАТ (метод конечных разностей во временной области) и САПР EMPro (метод конечных элементов), так и экспериментально в безэховой камере. Исследования ДН для МНВА различной длины, диаметра, также размеров экрана см. в [6а].

Модель МНВА была создана в полном электромагнитном коде КАРАТ в 2.5-D геометрии. Рассматривается осесимметричный случай с идеально согласованным слоем (ИСС, Perfect Matching Layer – PML) на границах счетной области. Металлический экран и штырь МНВА

заданы как идеально проводящие поверхности. Моделирование осуществлялось методом конечных разностей во временной области. Диаграмма направленности считалась на сфере радиусом $\rho=70$ см.

Модель в программе EMPro создана в трехмерной геометрии в системе координат *xuz* с изменяемыми размерами и идеальным согласованным слоем (perfect matching layer, PML) [108] на краях счетной области. В качестве материала штыря антенны задавалась медь, а экрана антенны – алюминий. Расчет проводился методом конечных элементов (FEM) в блоке Agilent FEM Simulator [103, 2а, 6а].

Общая схема четвертьволнового несимметричного вибратора длиной $l_{ант}$, с диаметром $d_{ант} = 2r_{ант}$ и металлическим дисковым экраном диаметра $D_{экр} = 2R_{экр}$ изображена слева на рисунке 2.6.

Модель в программе EMPro создана в трехмерной геометрии в системе координат *xuz* с изменяемыми размерами и идеальным поглощающим слоем на краях счетной зоны. Расчет проводился методом конечных элементов в блоке Agilent FEM Simulator.

На рисунке 2.6 справа приведены результаты численного моделирования и измерения диаграммы направленности для МНВА с $l_{ант} = 4,1$; $d_{ант} = 0,3$ см и $D_{экр} = 18$ см на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц. Как видно из графиков диаграммы направленности хорошо совпадают по основным лепесткам, имея различия в уровне и положении боковых лепестков. Для диаграммы направленности полученной в коде КАРАТ отклонение лепестков объясняется близким расположением границы счетной области с поглотителем к задней стенке экрана.

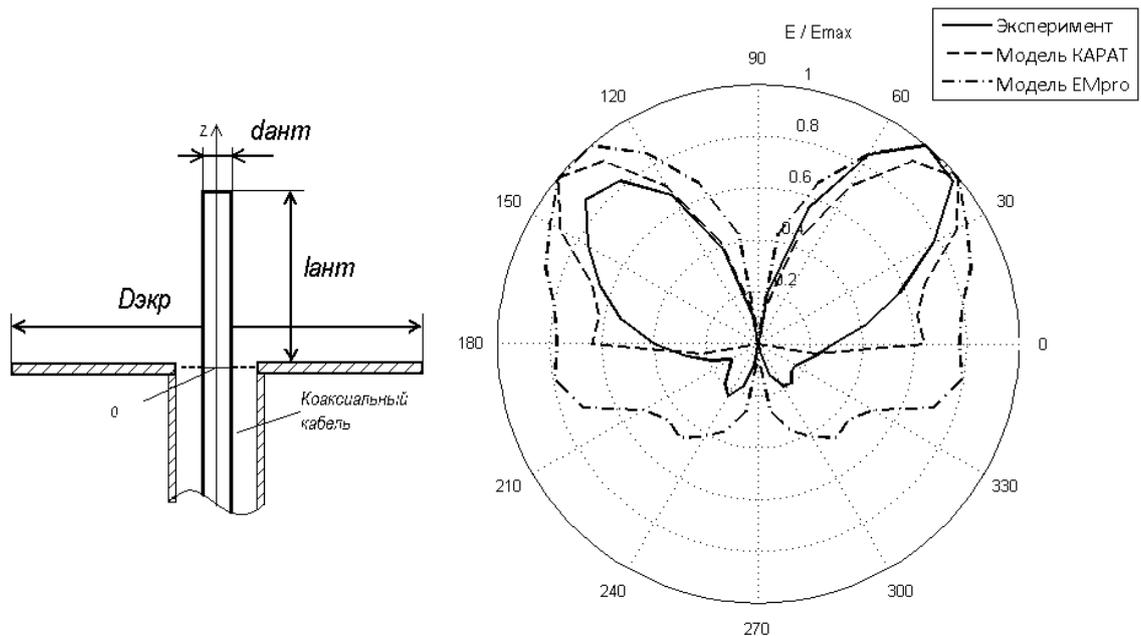


Рисунок 2.6. Схема несимметричного вибратора (слева) и диаграммы направленности для МНВА по результатам моделирования и измерения (справа).

Сравнение результатов моделирования в САПР EMPro и коде KARAT с результатами измерений демонстрирует допустимость моделирования антенных устройств в коде KARAT [2а, 6а].

2.3.2 Модель ПНВА с использованием теории Друде

Численные модели плазменной и металлической четвертьволновых несимметричных вибраторных антенн были созданы в электродинамическом коде KARAT. Схема 2,5D модели для плазменного несимметричной вибраторной антенны приведена на рисунке 2.7. 2,5D модель в коде KARAT с осевой симметрией по z позволяет моделировать полноценную двумерную модель в координатах rz с учётом распределения полей по осир в предположении осевой симметрии. Данная модель с малой расчётной областью для исследования поле антенны в ближней зоне, для расчета и построения диаграммы направленности использовалась модель с размерами расчётной области 90×90 см. Шаг сетки составлял 0,30 см по оси z и 0,15 см по оси r , что обеспечивалось устойчивость модели. Модель состоит из коаксиального кабеля 1 с центральной жилой радиусом

$r = 0,5$ см и внешним проводником с $R = 1,2$ см, плазменного цилиндра 2 длиной $l_a = 4,5$ см и радиусом $r_a = 0,5$ см, металлического экрана 3, достигающего края счётной области (модель бесконечного экрана и поглотителя 4 (идеально согласованного слоя) на краях счетной области. Модель металлической антенны аналогична модели плазменной антенны, но плазменная трубка заменена металлическим штырем таких же размеров..

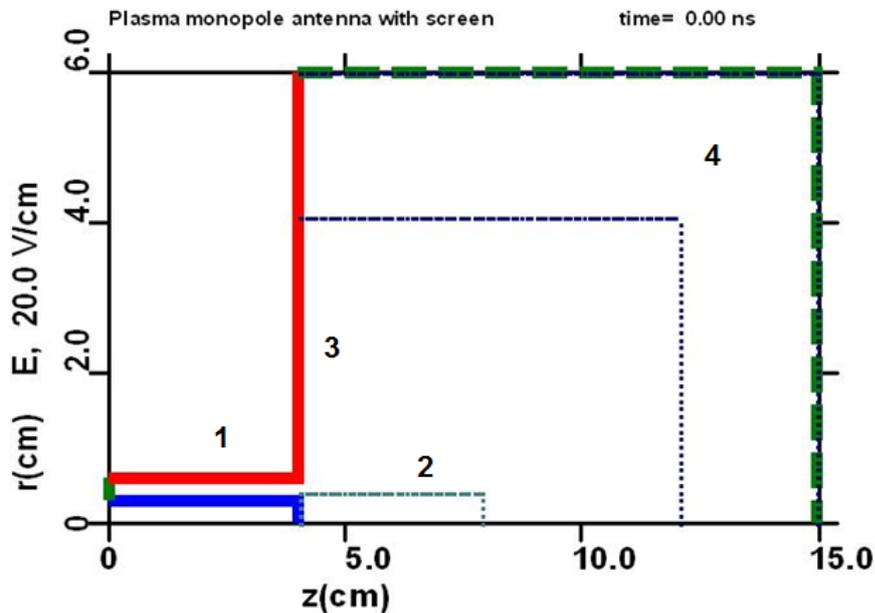


Рисунок 2.7. Схема численной модели ПНВА с использованием модели Друде.

Для металла использовалась модель идеального проводника, а плазма в модели задавалась как среда, описываемая по теории Друде (модель Друде-Лоренца) [76-79], где диэлектрическая проницаемость плазмы определяется по формуле:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu_e)} \quad (2.1)$$

В решаемой задаче через коаксиальный кабель на плазменную (металлическую) антенну подавался импульс гауссовой формы длительностью $\tau_{и} = 15$ нс на частоте 1,7 ГГц. Концентрация плазмы в моделировании менялась в соответствии с условиями поставленной задачи. Распределение компонент электрического поля в ближней зоне

антенн фиксировалась по оси z вдоль линии $r = 2$ см, а по оси r вдоль линии $z = 6$ см.

2.3.3 Модель ПНВА с использованием PIC метода

Использование модели Друде не позволяет учитывать эффекты, связанные с взаимодействием электромагнитной волны и частиц плазмы. В коде КАРАТ есть возможность использовать PIC метод для моделирования плазмы в ПНВА. Суть PIC метода состоит в представлении моделируемого объекта (газ, плазма) набором дискретных частиц, которые под действием внешних сил (гравитация, электрическое и магнитное поля) перемещаются в пространстве. Силы, необходимые для движения модельных частиц, определяются в узлах пространственной сетки из решения системы алгебраических уравнений. Алгебраические уравнения получаются после аппроксимации дифференциальных уравнений описывающих вычисляемые поля. Параметры плазмы, используемые для вычисления сил, определяют в узлах заанной прямоугольной сетки по координатам и скоростям модельных частиц. Таким образом, модельная частица получается как бы запертой в ячейке. Точность результатов расчета PIC метода, зависит от размеров ячеек сетки и количества модельных частиц. Чем меньше пространственные шаги, чем больше модельных частиц в ячейках, тем выше точность расчета [109-111].

Схема модели ПНВА с использованием PIC метода представлена на рисунке 2.8. Из коаксиального кабеля 1 электромагнитная волна поступает на плазму в диэлектрической трубке 2, которая вместе с металлическим экраном 3 образует несимметричную вибраторную антенну. Плазма в диэлектрической стеклянной трубке представлена с помощью PIC модели. На границах счетной области размещён PML слой. Спектры сигнала фиксируются внутри плазмы – точка номер 1 ($z=5,5$ см, $r=0,2$ см) и точка номер 2 ($z=7$ см, $r=0,5$ см) и в ближней зоне антенны – точка номер 3 ($z=8$ см, $r=5,8$ см). Расположение точки номер 3 в ближней зоне вынужденная мера, так как увеличение размеров моделируемой области нарушит

устойчивость модели. Такое расположение точки 3 не сказывается существенно на исследуемых параметрах.

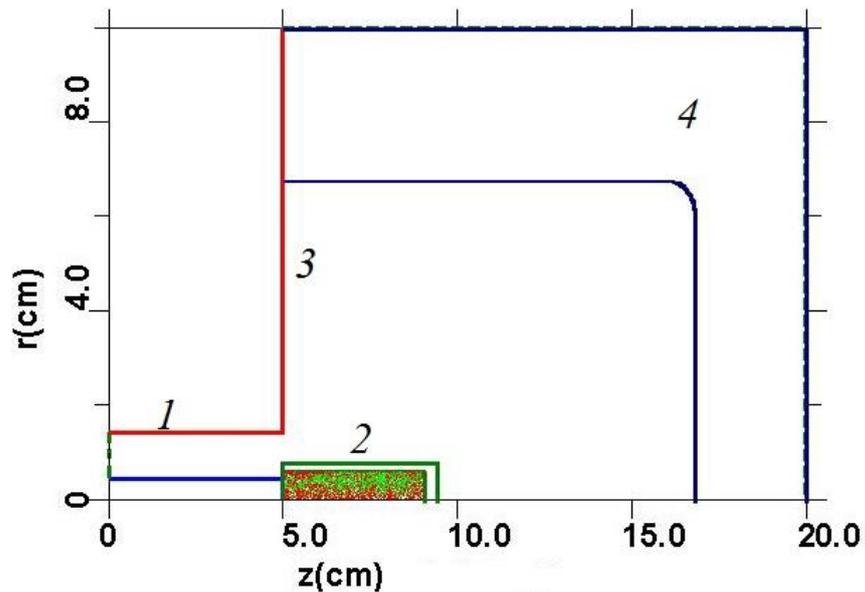


Рисунок 2.8. Схема численной модели ПНВА с использованием РИС метода.

Выводы из главы 2

В этой главе анализируются экспериментальные стенды (методы) и возможные численные схемы для анализа антенной техники. Одной из основных характеристик антенн является диаграмма направленности. Поэтому подбор численной модели, адекватно описывающей работу плазменной антенны, был выполнен мною на основе сравнения диаграмм направленности металлической вибраторной антенны, полученных в численном моделировании и в экспериментальных измерениях. На основании этого сравнения было решено использовать электромагнитный код КАРАТ, в которой были созданы две численные модели плазменной несимметричной вибраторной антенны. Первая модель рассматривает плазму как среду с диэлектрической проницаемостью вида по теории Друде. Во второй модели использован метод «частица в ячейке» (РИС метод) для исследования влияния плазменной среды на излучаемый сигнал.

Глава 3. Поверхностная электромагнитная волна и режимы работы плазменной несимметричной вибраторной антенны

3.1. Поверхностная электромагнитная волна на плазменном цилиндре

Работа исследуемой плазменной несимметричной вибраторной антенны связана с поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) на плазменном цилиндре [112, 80-92]. На неидеальном одиночном проводнике в диэлектрическом покрытии распространяется поверхностная электромагнитная волна азимутально-симметричного типа E_0 . Это вызвано конечным значение проводимости материала проводника [113,114]. Такая волна имеет три компоненты поля E_r , E_z и H_φ с резко убывающей по радиусу амплитудой внутрь от границы проводник-диэлектрик и более медленным экспоненциальным спадом снаружи. Теоретическое описание такой волны дал А. Зоммерфельд в 1899 г. [80]. Чуть позже ученик Зоммерфельда И. Ценнек экспериментально исследовал поверхностную электромагнитную волну на стержне из неидеального проводника. Проводник с конечной проводимостью можно рассматривать как замедляющую структуру для распространяющейся по нему волны, так как часть поля ПЭВ, проникающая в проводник на глубину скин-слоя, возвращается на поверхность с заметным опозданием. Величина скин-слоя определяется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{2c^2}{\sigma\omega}}, \quad (3.1)$$

где c – скорость света в вакууме, $\omega = 2\pi f$ — частота электромагнитной волны; σ — проводимость материала антенны.

Существование поверхностной электромагнитной волны на плазме связано с тем, что плазма является неидеальным проводником. Диэлектрическая проницаемость, описывающая электромагнитные

свойства газовой плазмы и металлов, имеет одинаковый вид, согласно теории Друде [74, 75]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu_e)} = \begin{cases} 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 - i \frac{\nu_e}{\omega}\right), & \omega \gg \nu_e, \\ 1 - \frac{\omega_p^2}{\nu_e^2} + i \frac{\omega_p^2}{\omega \nu_e}, & \omega \ll \nu_e, \end{cases} \quad (3.2)$$

где $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m}}$ – плазменная (ленгмюровская) частота, равная: $\omega \approx 10^{15} - 10^{16}$ рад/с для металлов, и $\omega_p \approx 10^9 - 10^{13}$ рад/с для плазмы в газоразрядных трубках. Величины n_e, m_e и e – концентрация, масса и заряд электронов соответственно, ν_e – частота столкновений электронов (обратное время релаксации импульса). Для металлов $\nu_e = 10^{14} - 10^{15} \text{ с}^{-1}$ (частота волны $\omega \ll \nu_e$). В плазме в трубках с низким давлением газа ($p = 130 - 400 \text{ Па} = 1 - 3$ торр) получается слабостолкновительная плазма $\nu_e = 10^7 - 10^8 \text{ с}^{-1}$ ($\omega \gg \nu_e$), а в трубках же с высоким давлением газа ($p \geq 1 \text{ кПа} = 7,5$ торр) – сильностолкновительная плазма $\nu_e = 10^{10} - 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ($\omega \ll \nu_e$).

Структура симметричной поверхностной электромагнитной волны типа E_0 на цилиндрическом проводнике малого радиуса $r_0 \ll \lambda/2\pi$ ($\lambda = 2\pi c/\omega$ — длина электромагнитной волны в вакууме) в цилиндрических координатах r, φ, z имеет три составляющие поля отличные от нуля E_r, E_z и H_φ и описываемые следующими выражениями внутри и вне границ плазменного цилиндра:

$$\left. \begin{aligned} E_z &= Ai\beta I_0(\kappa r) e^{\beta z - \omega t} \\ E_r &= -\frac{\omega}{c} \beta I_0'(\kappa r) e^{\beta z - \omega t} \\ H_\varphi &= -Ai \frac{\omega}{c} \varepsilon I_0'(\kappa r) e^{\beta z - \omega t} \end{aligned} \right\} \leq 0 \quad (3.3a),$$

$$\left. \begin{aligned} E_z &= Bi\beta K_0(\kappa_0 r) e^{\beta z - \omega t} \\ E_r &= -Bi\beta K_0'(\kappa_0 r) e^{\beta z - \omega t} \\ H_\phi &= -Bi \frac{\omega}{c} \varepsilon K_0'(\kappa_0 r) e^{\beta z - \omega t} \end{aligned} \right\} \geq 0 \quad (3.36),$$

где A и B — амплитудные коэффициенты; I_0 , K_0 , I_0' и K_0' — модифицированные функции Бесселя первого и второго рода и их производные соответственно; $\beta = 2\pi/\lambda_s$, где λ_s — длина ПЭВ

На границе плазменного цилиндра $r = r_0$ амплитуды электрического и магнитного полей не терпят разрыва (граничные условия Леонтовича) и достигают здесь своих максимальных значений:

$$E_z = Ai\beta I_0(\kappa r_0) = Bi\beta K_0(\kappa_0 r_0) \quad (3.4)$$

Активное изучение распространения ПЭВ по плазменному столбу началось в 50–60-ые годы XX века [81-71]. Первые публикации об электромагнитных волнах, распространяющихся по плазменному столбу, аналогичных волне Зоммерфельда принадлежат группам Трайвелписа [81] и Гранатштейна [82,83]. Первоначально эти волны рассматривались как волны пространственного заряда, в дальнейшем их стали называть поверхностными электромагнитными волнами. В работе Тума [84] была показана возможность генерации протяженных плазменных столбов с помощью ПЭВ. Были разработаны преобразователи для эффективного возбуждения поверхностных волн (сурфатроны) [86]. Это дало возможность создавать протяженные плазменные образования в газоразрядных трубках и изучать их характеристики [87-91, 112].

3.2. Режимы существования поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре

Дисперсионное уравнение для распространения азимутально-симметричной поверхностной электромагнитной волны на

цилиндрической поверхности проводящей среды с радиусом r_0 выглядит следующим образом [115]:

$$\varepsilon \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} \frac{K_0\left(\sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} r_0\right)}{K_0'\left(\sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} r_0\right)} - \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} \varepsilon \frac{I_0\left(\sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} \varepsilon r_0\right)}{I_0'\left(\sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} \varepsilon r_0\right)} = 0 \quad (3.5a)$$

или

$$\varepsilon \kappa_0 \frac{K_0(\kappa_0 r_0)}{K_0'(\kappa_0 r_0)} - \kappa_\varepsilon \frac{I_0(\kappa_\varepsilon r_0)}{I_0'(\kappa_\varepsilon r_0)} = 0, \quad (3.5b)$$

где $\kappa_0 = \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2}$; $\kappa_\varepsilon = \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} \varepsilon$, k_z – волновое число. У этого уравнения нет аналитического решения, но его можно исследовать численно.

Рассмотрим коротковолновый предел (большие аргументы бесселевых функций, то есть:

$$\kappa_0 r_0 = \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} r_0 \gg 1, \quad \kappa_\varepsilon r_0 = \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} \varepsilon r_0 \gg 1. \quad (3.6)$$

В таком случае уравнение (3.5б) переходит в дисперсионное уравнение для поверхностной электромагнитной волны на плоской границе раздела проводящая среда-вакуум [115,116]:

$$\varepsilon \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} + \sqrt{k_z^2 - \omega^2/c^2} \varepsilon = 0. \quad (3.7)$$

Этот случай подробно рассмотренный в [117].

Диэлектрическая проницаемость плазмopodobной среды $\varepsilon(\omega)$ для простоты рассматриваемая по теории Друде по формуле (3.2).

Следует отметить, что условием применимости плазменного описания является неравенство [80]:

$$\omega_p^2 \gg \nu_e^2 \quad (3.8)$$

Поэтому в случае плазмы в пределе $\omega \ll v_e$ действительная часть диэлектрической проницаемости (первые два слагаемых в нижнем выражении (3.2)) всегда отрицательна.

Для длинноволнового предела, который представляет большой интерес [76,77], выполняется следующее неравенство:

$$r_0^2 \kappa_0^2 = r_0^2 \left(k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \cong \frac{\omega^2 r_0^2}{c^2 \varepsilon} \ll 1. \quad (3.9)$$

Тогда уравнение (3.5б) для произвольного значения $\kappa_\varepsilon r_0$, с учетом свойств цилиндрических функций $\left(\lim_{x \rightarrow 0} \frac{K_0(x)}{K_0'(x)} \sim -x \ln \left(\frac{2}{\gamma x} \right) \right)$, где $\gamma = 1,781\dots$ – постоянная

Эйлера), запишется как:

$$\varepsilon r_0^2 \kappa_0^2 \ln \kappa_0 r_0 - r_0 \kappa_\varepsilon \frac{I_0(\kappa_\varepsilon r_0)}{I_0'(\kappa_\varepsilon r_0)} = 0.$$

или

$$\varepsilon r_0^2 \left(k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \ln r_0 \sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} - r_0 \sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} \varepsilon \frac{I_0 \left(\sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} \varepsilon r_0 \right)}{I_0' \left(\sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} \varepsilon r_0 \right)} = 0. \quad (3.10)$$

В пределе тонкого цилиндра $\left(\kappa_0 r_0 = \sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} r_0 \ll 1; \quad \kappa_\varepsilon r_0 = \sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} \varepsilon r_0 \ll 1 \right)$

получаем формулу из [117]:

$$\varepsilon \ln r_0 \sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} - \frac{2}{r_0^2 \left(k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right)} = 0. \quad (3.11)$$

В интересующей нас области – линейной части дисперсионной кривой $\omega \approx k_z c + \delta\omega$ и $\delta\omega \ll k_z c$, тогда из уравнения (3.11) для случая слабостолкновительной плазмы ($\omega \gg v_e$) получаем:

$$\frac{\delta\omega}{\omega} \approx \frac{2c^2}{r_0^2 \omega_p^2} \frac{1}{\ln(4\omega^2 / \omega_p^2)} \left(1 + \frac{i\pi}{\ln(4\omega^2 / \omega_p^2)} \right) = \frac{c^2}{r_0^2 \omega_p^2} \frac{1}{\ln(2\omega / \omega_p)} \left(1 + \frac{i\pi}{2\ln(2\omega / \omega_p)} \right),$$

А для случая сильностолкновительной плазмы ($\omega \ll v_e$) получим:

$$\frac{\delta\omega}{\omega} \approx \frac{2c^2}{r_0^2\omega_p^2} \frac{\nu}{\omega} \frac{i}{\ln(4\nu\omega/\omega_p^2)} \left(1 + \frac{i\pi}{2\ln(4\nu\omega/\omega_p^2)} \right).$$

В другом предельном случае – при условии $|\varepsilon| \gg 1$ приходим к (3.6), тогда из (3.10) получается уравнение:

$$\varepsilon r_0^2 \left(k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \ln r_0 \sqrt{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} - r_0 \sqrt{-\frac{\omega^2}{c^2}} \varepsilon = 0. \quad (3.12)$$

В таком случае для линейной части дисперсионной кривой для слабостолкновительной плазмы ($\omega \gg \nu_e$) имеем:

$$\frac{\delta\omega}{\omega} \approx \frac{c}{r_0\omega_p} \sqrt{1 + \frac{i\nu}{\omega} \left[\ln \frac{c\omega_p}{2r_0\omega\nu} - i \frac{\nu}{2\omega} \right]^{-1}} \approx \frac{c}{r_0\omega_p} \frac{1}{\ln(c\omega_p/2r_0\omega\nu)} \left(1 + i \frac{\nu}{2\omega} - \frac{i\nu}{2\omega \ln(c\omega_p/2r_0\omega\nu)} \right),$$

и для случая сильностолкновительной плазмы ($\omega \ll \nu_e$)

$$\begin{aligned} \frac{\delta\omega}{\omega} &\approx \frac{2c}{r_0\omega_p} \sqrt{i \frac{\nu}{\omega} \left(\ln \left(-i \frac{c^2\omega_p^2}{4r_0^2\omega^3\nu} \right) \right)^{-1}} \approx (1+i) \frac{c}{r_0\omega_p} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega} \left(\ln \left(\frac{c^2\omega_p^2}{4r_0^2\omega^3\nu} \right) - i \frac{\pi}{2} \right)^{-1}} \approx \\ &\approx \frac{c}{r_0\omega_p} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega} \left(\ln \left(\frac{c^2\omega_p^2}{4r_0^2\omega^3\nu} \right) \right)^{-2} \left(\ln \left(\frac{c^2\omega_p^2}{4r_0^2\omega^3\nu} \right) - \frac{\pi}{2} + i \left(\ln \left(\frac{c^2\omega_p^2}{4r_0^2\omega^3\nu} \right) + \frac{\pi}{2} \right) \right)}. \end{aligned}$$

В этих выражения мнимая часть $\delta\omega/\omega$ характеризует ослабление поля во времени при заданной длине волны. Можно также решать задачу ослабления поля вдоль направления распространения электромагнитной поверхностной электромагнитной волны при заданной частоте, $k_z = \omega/c + \delta k_z$ (где $\delta k_z \ll \omega/c$): $\delta k_z = -\delta\omega/c$.

Уравнение (3.5а) не имеет аналитического решения, поэтому оно было решено численно в программе Mathematica [118, 4а]. На рисунке 3.1 представлена действительная часть решения дисперсионного уравнения для плазменного цилиндра с радиусом $r_0 = 0,5$ см, при трех значениях концентрации плазмы n_e (см. таблицу 3.1) с частотой электронных столкновений $\nu_e = 10^8$ с⁻¹. Обозначения 1-3 на рисунке 3.1 соответствуют порядковым номерам из таблицы 3.1, где $\omega_0 = 1,07 \cdot 10^9$ рад/с ($f_0 = 1,7$ ГГц). На основании графика можно выделить три режима распространения

поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре. Первый режим при $\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$, когда дисперсионная характеристика подходит к отсечке – режим существования стоячей электромагнитной волны на поверхности плазменного цилиндра или режим насыщения. Вторым режим при $\omega_p \approx 5 \cdot \omega_0$, когда дисперсионная характеристика имеет криволинейный участок, – нелинейный режим. Третий режим – линейный, когда $\omega_p \geq 10 \cdot \omega_0$, а дисперсионная характеристика поверхностной электромагнитной волны линейна и близка к линии kz .

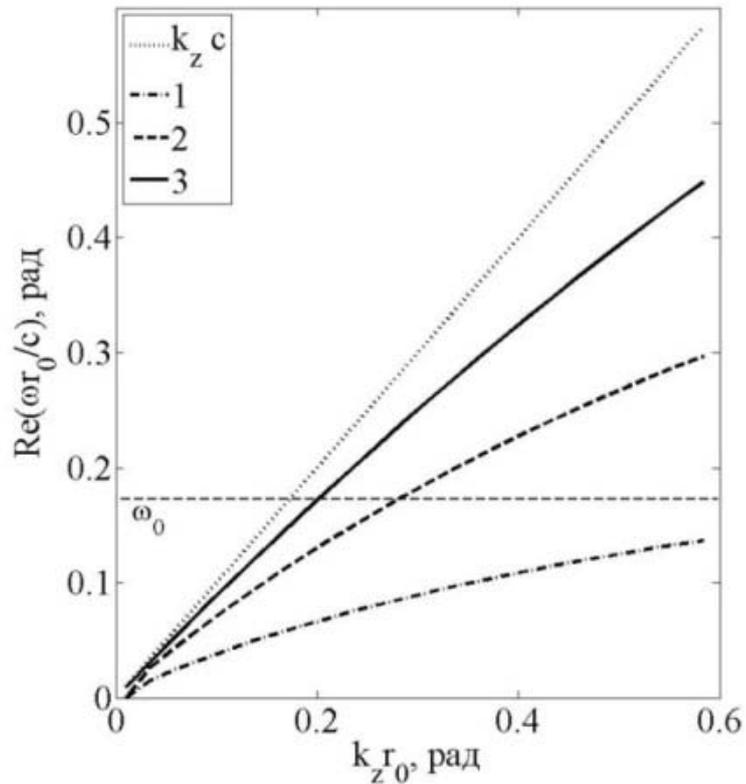


Рисунок 3.1. Действительные части дисперсионных характеристик поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре с параметрами из таблицы 3.1: 1 – $\omega_p = \sqrt{2} \omega_0$, 2 – $\omega_p = 5\omega_0$, 3 – $\omega_p = 10\omega_0$.

Таблица 3.1

№ п/п	Соотношение ω_p и f_0	Значение ω_p , рад/с	Значение n_e , см^{-3}	Режим ПЭВ
1	$\sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$	$1,58 \cdot 10^{10}$	$8,0 \cdot 10^{10}$	Насыщение

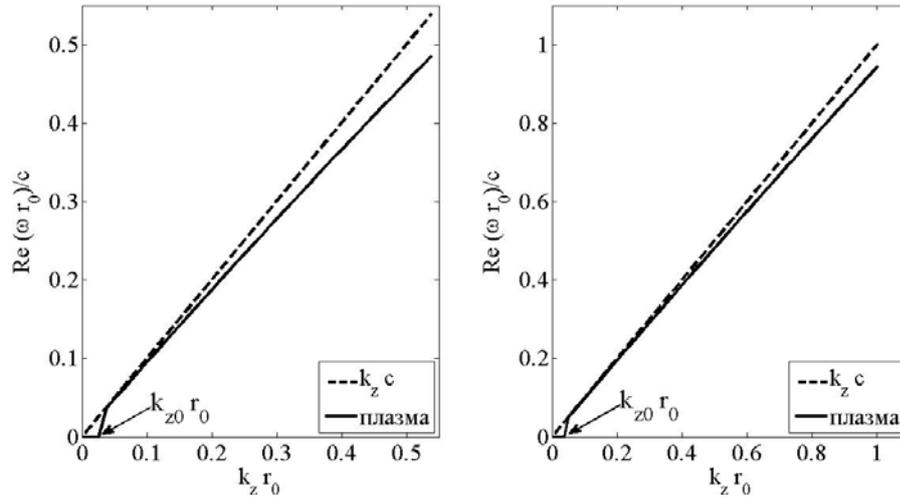
2	$5 \cdot 2\pi f_0$	$5,35 \cdot 10^{10}$	$9,1 \cdot 10^{11}$	Нелинейный
3	$10 \cdot 2\pi f_0$	$1,07 \cdot 10^{11}$	$3,6 \cdot 10^{12}$	Линейный

Из (3.8) и (3.9) получаем, что для линейного режима существования ПЭВ на плазменном цилиндре со скоростью очень близкой к скорости света плазменная частота должна быть $\omega_p \geq 30\omega_0$ для слабостолкновительной плазмы ($\omega \gg v_e$, $v_e = 10^8 \text{ с}^{-1}$). Для случая сильностолкновительной плазмы ($\omega \ll v_e$, $v_e = 10^{11} \text{ с}^{-1}$) плазменная частота должна быть $\omega_p \geq 160 \omega_0$. В данных условиях ПЭВ будет слабо замедляться, и её поле будет мало отличаться от поля объемной электромагнитной волны.

Рассмотрим действительные и мнимые части решения дисперсионного уравнения (3.5а) для линейного режима существования ПЭВ на плазменном цилиндре со скоростью очень близкой к скорости света для частоты $f_0 = 1 \text{ ГГц}$ ($\omega_0 = 6,28 \cdot 10^9 \text{ рад/с}$) на рисунке 3.2. Графики приведены для плазмы с $\omega_p = 1,88 \cdot 10^{11} \text{ рад/с}$ ($n_e = 1,13 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), $v_e = 10^8 \text{ с}^{-1}$ и радиусов цилиндра $r_0 = 0,5 \text{ см}$ (рисунок 3.2а) и $r_0 = 1 \text{ см}$ (рисунок 3.2б). На рисунке 3.3 изображены решения уравнения (3.5а) для плазмы $\omega_p = 10^{12} \text{ рад/с}$ ($n_e = 3,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), $v_e = 10^{11} \text{ с}^{-1}$ и радиусов цилиндра $r_0 = 0,5 \text{ см}$ (рисунок 3.3а) и $r_0 = 1 \text{ см}$ (рисунок 3.3б). На рисунке 3.2а и рисунке 3.3а частоте ω_0 соответствует значение 0,1 по вертикальной оси, а для рисунка 3.2б и рисунка 3.3б – значение 0,2.

Как видно из графиков дисперсионных кривых, зависимости действительной части частоты волны от волнового числа для ω_0 близки к линии $k_z c$ для всех рассматриваемых случаев. Важно отметить, что для сильностолкновительной плазмы $r_0 = 1 \text{ см}$ дисперсионная характеристика почти полностью совпадает с линией $k_z c$, лишь при $0 < k_z < k_{z0}$ $\text{Re}(\omega r_0 / c) = 0$. Подобная особенность имеет место и для случая слабостолкновительной плазмы на рисунке 3.1а и 3.1б. Дисперсионная характеристика на рисунке 3.3а также имеет особенность $\text{Re}(\omega r_0 / c) = 0$

при $k_z \rightarrow 0$, но в выбранном масштабе её не видно. Указанная особенность связана с тем, что если $\neq 0$, то всегда есть область $0 < k_z < k_{z0}$, где $\text{Re}(\omega) > 0$, $\text{Im}(\omega) < 0$. Тогда групповая скорость в точке k_{z0} обращается в бесконечность, так как в этой области всегда есть действительные корни уравнения (3.5а). При продлении дисперсионных кривых в область более высоких частот (больших k_z) заметен их отход от линии $k_z c$ для всех случаев, кроме случая сильностолкновительной плазмы радиуса $r_0 = 1$ см (рисунок 3.3б). Это связано с тем, что волна имеет отсечку при $\omega = \omega_p / \sqrt{2}$, когда существует лишь потенциальная поверхностная электромагнитная волна вдоль плазменного цилиндра, которая не излучается в окружающее пространство. Для сильностолкновительной плазмы плазменная частота была больше чем для слабостолкновительной плазмы, соответственно, линия отсечки на рисунке 3.3 проходит намного выше, чем на рисунке 3.2.



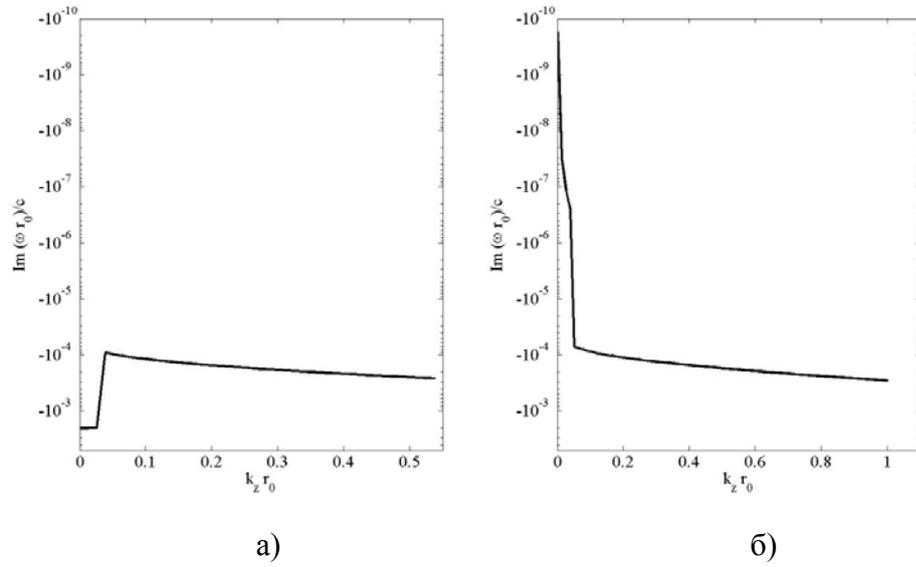
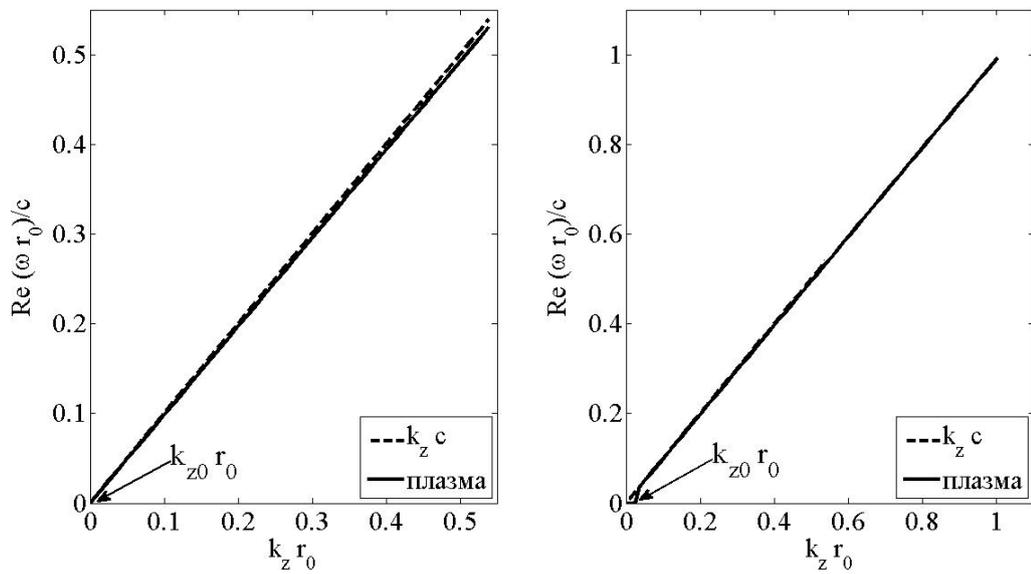


Рисунок. 3.2. Действительная и мнимая части решения дисперсионного уравнения для плазменного цилиндрического столба с $\omega_p = 1.88 \cdot 10^{11}$ рад/с ($n_e = 1.13 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$), $v_e = 10^8$ с $^{-1}$ и радиусом: а) $r_0 = 0.5$ см, б) $r_0 = 1$ см.



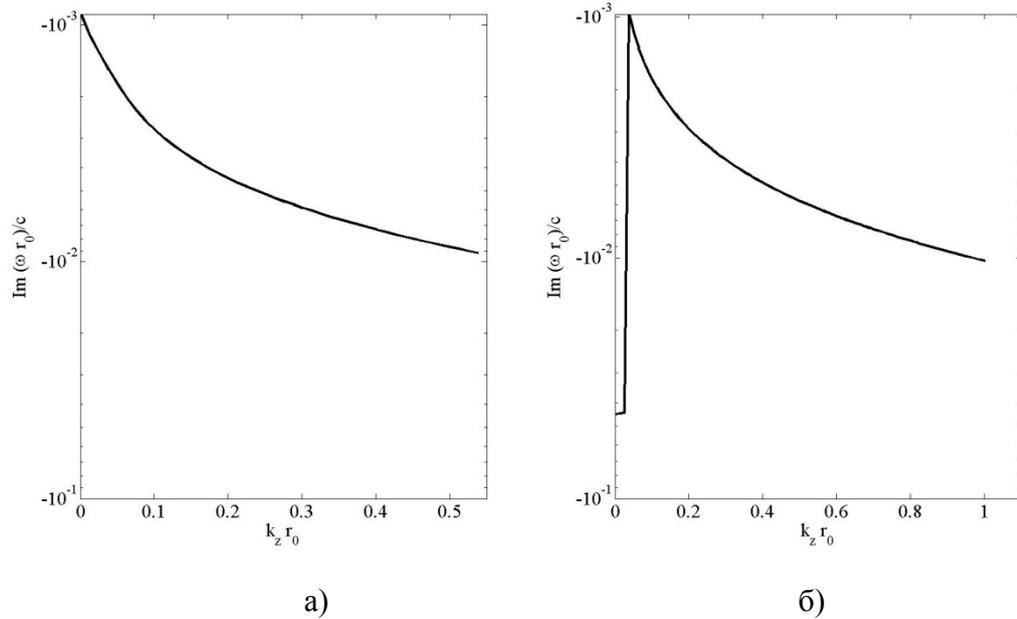


Рисунок. 3.3. Действительная и мнимая части решения дисперсионного уравнения для плазменного цилиндрического столба с $\omega_p = 10^{12}$ рад/с ($n_e = 3.2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$), $v_e = 10^{11}$ с $^{-1}$ и радиусом: а) $r_0 = 0.5$ см, б) $r_0 = 1$ см.

Зависимость мнимой части частоты волны от волнового числа на рисунках 3.2 и 3.3 показывает, что потери в слабостолкновительной плазме меньше, чем в сильностолкновительной плазме. Отметим, что для $k_{z0} < k_z < k_{z0} + \Delta k_z$ имеет место скачкообразное уменьшение потерь для плазменного цилиндра с $v_e = 10^8$ с $^{-1}$, $r_0 = 0,5$ см и $v_e = 10^{11}$ с $^{-1}$ и радиусов $r_0 = 0,5$ и 1 см, при этом скачкообразный рост для плазменного цилиндра с $v_e = 10^8$ с $^{-1}$, $r_0 = 1$ см. Этот факт был объяснен выше. При увеличении k_z $\text{Im}(\omega)$ медленно, растёт, что соответствует плавному увеличению потерь [4а].

3.3. Режимы работы плазменной несимметричной вибраторной антенны

Для того чтобы изучить влияние режимов распространения поверхностной электромагнитной волны описанных в параграфе 3.2 на характеристики ПНВА было численное моделирование в коде КАРАТ. При численном моделировании плазменной антенны использовалась модель плазмы как среды с диэлектрической проницаемостью вида (3.2).

Были построены зависимости пространственного распределения составляющих $E_z(r)$ и $E_r(z)$ на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц (рисунки 3.4 и 3.5) для плазменной и металлической антенн с длиной $l_{ант} = 4$ см, диаметром $d_{ант} = 1$ см и экраном с диаметром $D_{экр} = \infty$. Для плазменной антенны зависимости приведены для параметров из таблицы 3.1.

Так как поле четвертьволнового вибратора имеет структуру Е-волны ($E_\phi = 0$), а в дальней зоне приобретает структуру ТЕМ-волны [71] и составляющая $E_r(r)|_\infty = 0$, то исследовалась зависимость $E_z(r)$. Выбор $E_r(z)$ обусловлен пропорциональностью этой составляющей распределению заряда Q вдоль антенны.

На рисунке 3.4 представлены распределения поля $E_r(z)$ для МНВА и ПНВА в трех режимах работы, которые соответствуют трем режимам существования ПЭВ. На рисунке 3.4. антенна расположена вдоль оси z от $z = 4$ см до $z = 8$ см. В первом режиме (режим стоячей поверхностной электромагнитной волны) при концентрации плазмы $n_e = 8,0 \cdot 10^{10}$ см⁻³ ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$) формируется поверхностная стоячая волна с длиной $\lambda \approx 1,5$ см вдоль плазменного столба (кривая 1, № 1 в таблице 3.1) без излучения её в окружающее пространство. Второй режим – нелинейный – проявляется при концентрации плазмы $n_e = 9,1 \cdot 10^{11}$ см⁻³ ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$) (кривая 2, № 2 в таблице 3.1), когда есть излучение волны в окружающее пространство, но вид распределения $E_r(z)$ для ПНВА сильно отличается от аналогичного для МНВА. В третьем режиме (линейном) при $n_e = 3,6 \cdot 10^{12}$ см⁻³ ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) (№ 3 в таблице 3.1) распределение поля $E_r(z)$ и излучение волны в окружающее пространство плазменной антенны близки по характеру к аналогичной металлической (кривые 3 и 4).

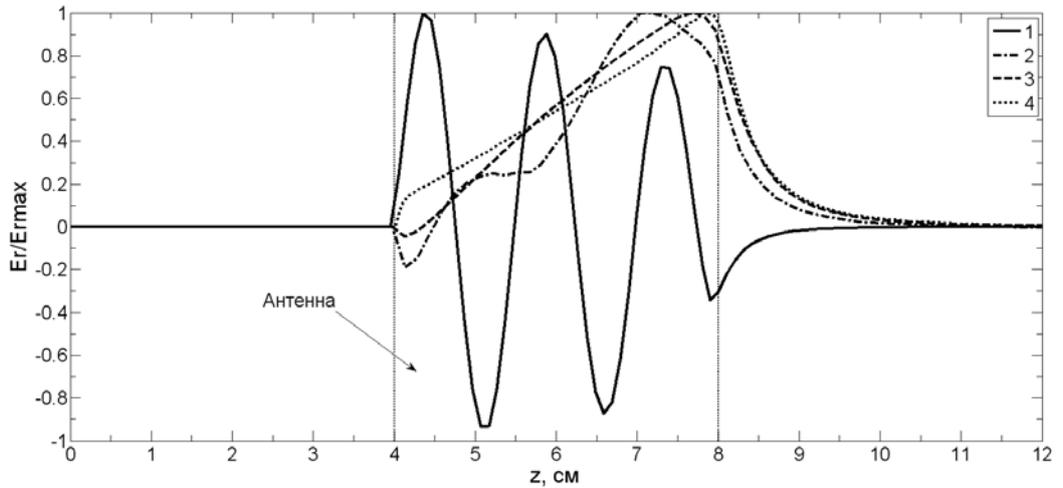


Рисунок 3.4 Распределения E_r , по z для плазменной антенны с параметрами из таблицы 3.1: 1 – $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$), 2 – $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$), 3 – $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) и 4 – для металлической антенны.

На рисунке 3.5 для этих же значений концентрации плазмы представлены структуры поля $E_z(r)$. Здесь также видно три качественно различных режима работы плазменной антенны. В первом режиме (кривая 1) можно наблюдать как $E_z(r)$ затухает в обе стороны от границы плазма-диэлектрик с различной скоростью, при этом в вакууме она затухает на расстоянии $a=1 \text{ см}$, что много меньше длины волны подаваемой на антенну $\lambda_0 \approx 18 \text{ см}$. Это говорит о том, что когда $\omega_p = \sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$, антенна работает как линия поверхностной электромагнитной волны без излучения в окружающее пространство.

Нелинейный режим характеризуется наличием в распределении $E_z(r)$ (кривая 2) как составляющей поверхностной электромагнитной волны, так и составляющей излучаемой объемной волны. Поверхностная часть волны медленно затухает в глубь плазмы, а излучаемая объемная волна для случая

$\omega_p = 5 \cdot 2\pi f_0$ отличается по фазе более чем на 60° от излучения металлической антенны (кривая 4).

В третьем режиме при (кривая 2) $E_z(r)$ состоит из поверхностной и объемной части волны, но при этом поверхностная электромагнитная волна быстро затухает в плазме, а объемная часть отличается от случая МНВА (кривая 4) лишь на 20° по фазе. Разница в фазе $E_z(r)$ для реальных ПНВА и МНВА из неидеальных проводников может быть меньше в связи с конечностью скин-слоя в материалах МНВА.

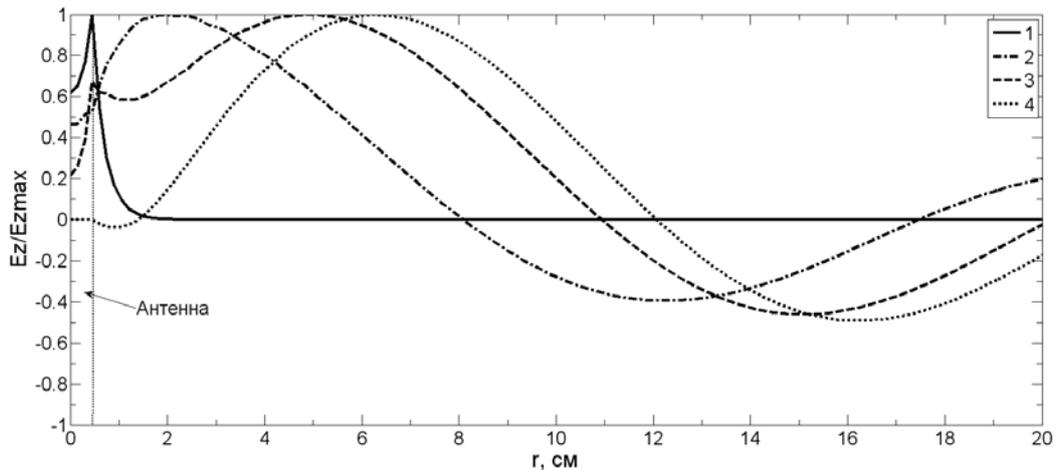


Рисунок 3.5 Распределения E_z по r для плазменной антенны с параметрами из таблицы 3.1: 1 – $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$), 2 – $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$), 3 – $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) и 4 – для металлической антенны.

Для МНВА и трех рассматриваемых различных случаев режимов работы ПНВА (концентрации плазмы $n_e = 8,0 \cdot 10^{10}$; $9,1 \cdot 10^{11}$; $3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) были построены диаграммы направленности (рисунок 3.6). Для плазменной антенны (кривые 1–3) ДН по амплитуде поля нормированы на ДН металлической антенны (кривая 4) и построены в прямоугольной системе координат для значений θ взятых от 0 до 90° (0° совпадает с осью антенны).

Как видно из представленных диаграмм в случае $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ кривая 1 близка к 0, т.е. при $\omega_p = \sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$, как уже отмечалось выше, антенна не излучает энергию волны. В переходном режиме (кривая 2) $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $\omega_p = 5 \cdot 2\pi f_0$ ДН меньше по амплитуде, чем ДН металлической антенны, что говорит о неоптимальной работе антенны в по

сравнению с МНВА. ДН для режима излучения $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $\omega_p = 10 \cdot 2\pi f_0$ кривая 3 очень близка к кривой 4, из чего следует, что при $\omega_p \geq 10 \cdot 2\pi f_0$ плазменная антенна по характеристикам близка к металлической [2а-4а].

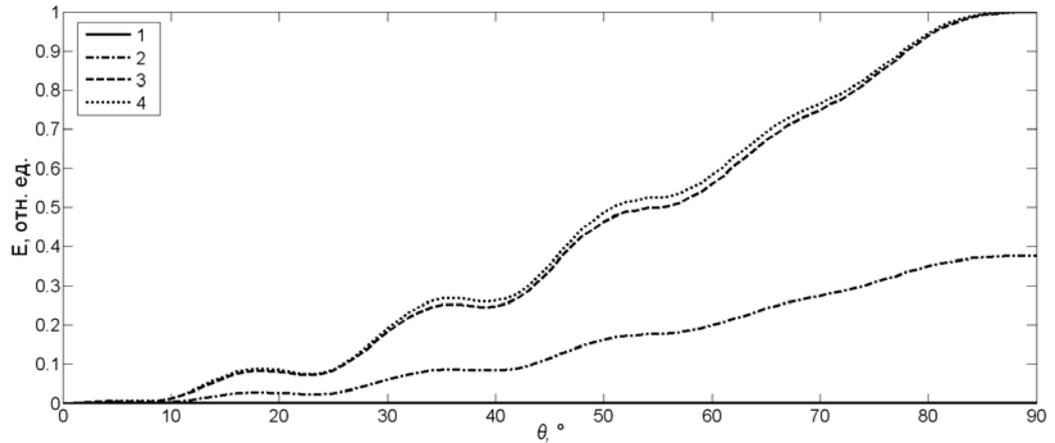


Рисунок 3.6. Диаграммы направленности антенн: плазменной антенны с параметрами из таблицы 3.1: 1 – $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$), 2 – $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$), 3 – $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) и 4 – металлической антенны.

3.4. Экспериментальные измерения диаграммы направленности ПНВА и МНВА

В безэховой камере отдела 21 АО «НИИ «Кулон» были экспериментально измерены диаграммы направленности ПНВА длиной $l_a = 29 \text{ см}$ и внешним диаметром газоразрядной трубки (люминесцентной лампы) $d_a = 1,2 \text{ см}$ и МНВА с длиной $l_a = 29 \text{ см}$ и диаметром $d_a = 1 \text{ см}$. В качестве газоразрядной трубки ПНВА использовалась цилиндрическая люминесцентная лампа низкого давления ($p_a = 1 - 3 \text{ торр}$ и $p_{pm} = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ торр}$). Электронная концентрация в плазме газового разряда в люминесцентной лампе ПНВА по оценкам находится в диапазоне $n_e \approx 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что соответствует плазменной частоте $f_p \approx 10^9 - 10^{11} \text{ Гц}$. Эти параметры отвечают линейному режиму работы ПНВА для частоты входной электромагнитной волны $f_0 = 445 \text{ МГц}$.

На рисунке 3.7 представлены нормированные диаграммы направленности в Е-плоскости для ПНВА и МНВА в полярных (рисунок 3.7а) и декартовых (рисунок 3.7б) координатах. Из рисунков видно, что максимумы основных лепестков ДН для ПНВА и МНВА близки по положению в пространстве ($50-60^\circ$ и $300-310^\circ$), а уровень бокового лепестка по отношению к основному у ПНВА много меньше, чем у МНВА. Разница в амплитуде основного лепестка диаграммы направленности скорее всего вызвана затратами энергии на ионизацию плазмы и отличиями в соединении ПНВА и МНВА с коаксиальным кабелем [9а].

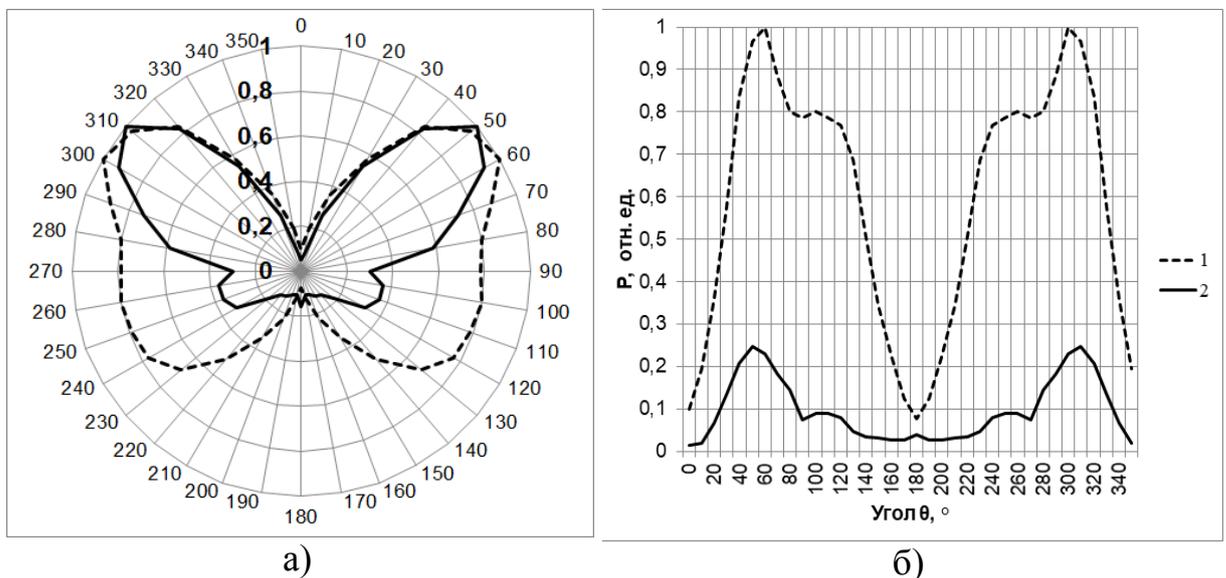


Рисунок 3.7 Диаграммы направленности: 1– МНВА с $l_a=29$ см, 2 – ПНВА с $l_a=29$ см; а) нормированные на максимальное значение для каждой диаграммы, б) нормированные на максимальное значение диаграммы МНВА с $l_a=29$ см

Выводы по главе 3

В рамках диссертационных исследований было установлена связь режимов работы плазменной антенны с распространением поверхностной электромагнитной волны вдоль немагнитного плазменного цилиндра [1а,2а].

По результатам численного моделирования видны качественно разные режимы работы плазменной антенны при изменении параметров

плазмы. Показаны три разных режима работы плазменной антенны при изменении концентрации плазмы n_e (частота столкновений электронов оставалась постоянной $\nu_e = 10^7 \text{ с}^{-1}$) и частоте внешнего импульса $f_0 = 1,7$ ГГц. В режиме излучения характеристики плазменной антенны в целом не хуже, чем характеристики металлической антенны [2а-4а].

Из дисперсионного уравнения для электромагнитной волны над плазменным цилиндром конечного радиуса были получены параметры плазмы для линейного режима работы плазменной антенны. Решение дисперсионного уравнения для электромагнитной волны вдоль плазменного цилиндра конечного радиуса r_0 и численное моделирование работы плазменной несимметричной вибраторной антенны показывают, что для слабо- и сильностолкновительной плазмы плазменная антенна в линейном режиме близка к металлической в широком диапазоне около f_0 . Показано наличие эффекта укорочения электрической длины плазменной вибраторной антенны в сравнении с аналогичной металлической [4а].

Глава 4. Сигнал плазменной несимметричной вибраторной антенны

Плазменные антенны, как и активные антенные системы, могут влиять на характеристики излучаемого сигнала. При оценке качества передаваемого сигнала в радиотехнических и телекоммуникационных системах необходимы исследования, как временного представления сигнала, так и спектрального. В этой главе представлены результаты экспериментальных и численных исследований спектральных характеристик сигнала, излучаемого ПНВА. Проведено сравнение результатов экспериментальных измерений спектров излучаемого сигнала для плазменной и металлической несимметричных вибраторных антенн.

Для плазмы газового разряда в люминесцентной лампе низкого давления, которая имеет электронную концентрацию в диапазоне $n_e \approx 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, частота ленгмюровских колебаний (плазменная частота) $f_p \approx 10^9 - 10^{11} \text{ Гц}$ соответствует диапазону ВЧ и СВЧ. Нелинейность плазмы может влиять на излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенны [96, 97].

В главе 3 показано влияние концентрации плазмы на режим работы и характеристики ПНВА. Высока вероятность влияния режимов работы и на характеристики сигнала излучаемого ПНВА, что исследуется в данной главе. Кроме того, необходимо учитывать, что создание плазмы в газоразрядной трубке в исследуемой системе происходит за счёт энергии сигнала от связного передатчика, как и в работах [96, 97].

4.1. Сравнение экспериментальных спектральных характеристик излучаемого сигнала ПНВА и МНВА

В результате экспериментальных измерений был получен спектр излучения немодулированного гармонического колебания для МНВА

(рисунок 4.1а) и ПНВА соединенного с коаксиальным кабелем через электрод газоразрядной трубки (рисунок 4.1б).

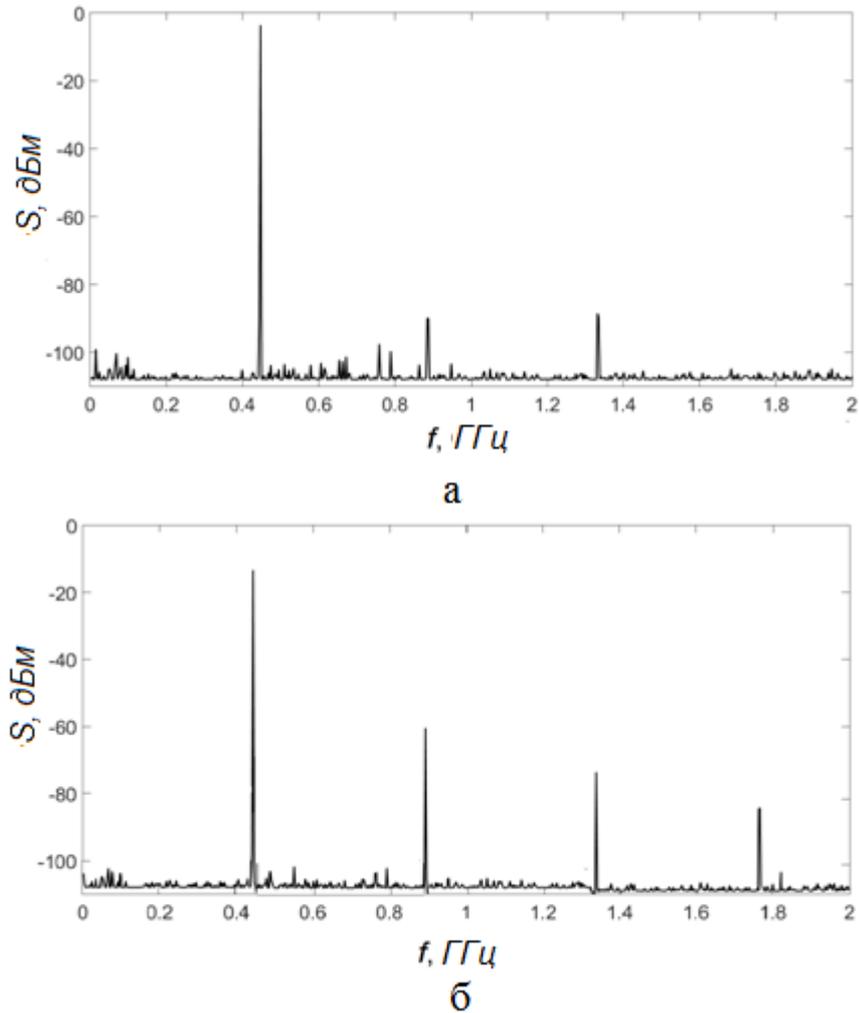


Рисунок. 4.1. Экспериментально измеренные спектры излучаемого немодулированного гармонического колебания (с учетом коэффициента ослабления аттенюатора): а) МНВА, б) ПНВА.

На рисунке 4.1а видно, что в спектре сигнала излучаемого МНВА, наряду с основной частотой излучаемого сигнала f_0 , есть составляющие на частотах второй $2f_0$ и третьей $3f_0$ гармоник. Этот факт связан с тем, что приёмопередатчик Vertex VX-2100 выдаёт квазигармонический сигнал сигнал с кратными гармониками несущей частоты, как указано в главе 2. На рисунке 4.1б видно, что в спектре излучения ПНВА через электрод газоразрядной трубки заметно усиление составляющих на частоте кратных гармоник: второй $2f_0$, третьей $3f_0$ и четвертой $4f_0$ (как и в работе [96]), по сравнению с сигналом от МНВА. Уровень спектральной плотности

мощности в спектре ПНВА на частоте основной гармоники почти на 12 дБ меньше (из-за худшего согласования и потерь на ионизацию газа), чем в спектре МНВА, а для остальных гармоник в на 10-30 дБ больше, чем в спектре МНВА. В таблице 4.1 приведены подробные численные данные по спектральной плотности мощности излучения на гармониках сигнала ПНВА и МНВА [9а].

Таблица 4.1

Мощность/ разность мощностей сигнала (на гармониках)	Мощность сигнала МНВА, дБм	Мощность сигнала ПНВА через электрод газоразрядной трубки, дБм
$P(f_0)$	-1,62	-13,33
$P(2f_0)$	-95,74	-58,85
$P(3f_0)$	-87,45	-71,89
$P(4f_0)$	<-100,00	-81,42
$P(f_0) - P(2f_0)$	94,12	45,53
$P(f_0) - P(3f_0)$	85,83	58,56
$P(f_0) - P(4f_0)$	>104,74	69,09

На рисунке 4.2 представлены графики спектральной плотности мощности частотно-модулированного (ЧМ) сигнала, излученного МНВА и ПНВА. Данные спектры измерены вблизи несущей частоты $f_0 = 446$ МГц в полосе шириной 50 кГц. В спектрах видно компоненту на частоте несущего колебания f_0 и компоненты на частотах $f_0 \pm F$ с отстройкой 5 кГц (частота модулирующего сигнала F). Кроме того, видны компоненты на частотах $f_0 \pm 2F$, $f_0 \pm 3F$ и т.д. Следует отметить, что мощность на частоте несущего колебания для сигнала, излучаемого ПНВА, на 12,20 дБ меньше,

чем мощность сигнала, излучаемого МНВА. Разница спектральной плотности мощности сигналов излучаемых ПНВА и МНВА на комбинационных частотах $f_0 \pm F$ составляет 12,21 дБ. Отсюда следует вывод, что соотношение спектральной плотности мощности информационного сигнала на частотах $f_0 \pm F$ и на несущей частоте f_0 одинаковы для случая ПНВА и МНВА. При этом соотношение спектральной плотности мощности информационного сигнала на частотах $f_0 \pm F$ и спектральной плотности мощности нелинейных компонент на комбинационных частотах $f_0 \pm 2F$ и $f_0 \pm 3F$ лучше для сигнала, излучаемого ПНВА. Подробные численные данные представлены в таблице 4.2.

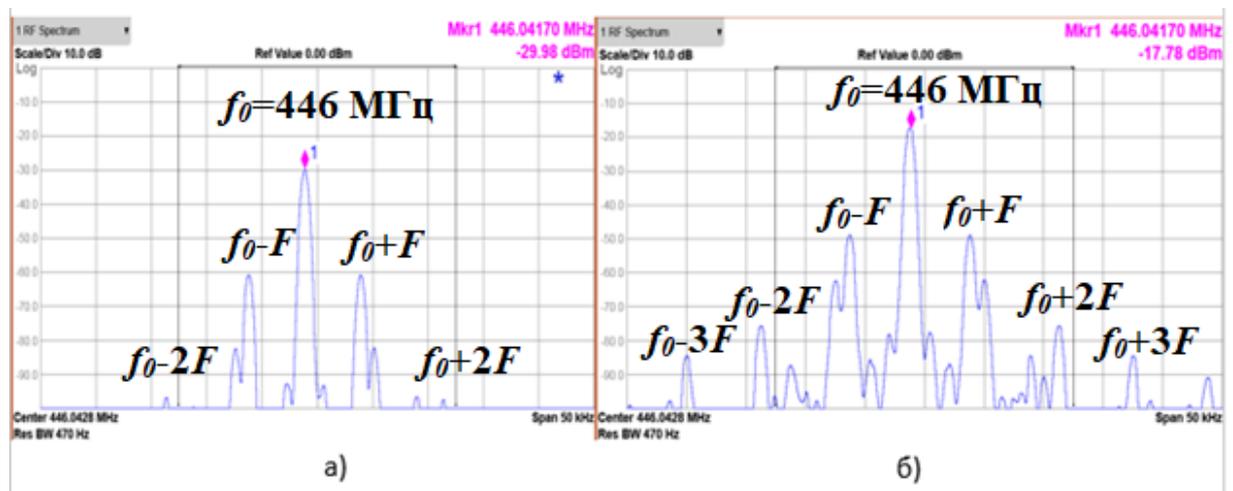


Рисунок 4.2. Спектральная плотности мощности ЧМ-сигнала, излучаемого:
а) ПНВА и б) МНВА.

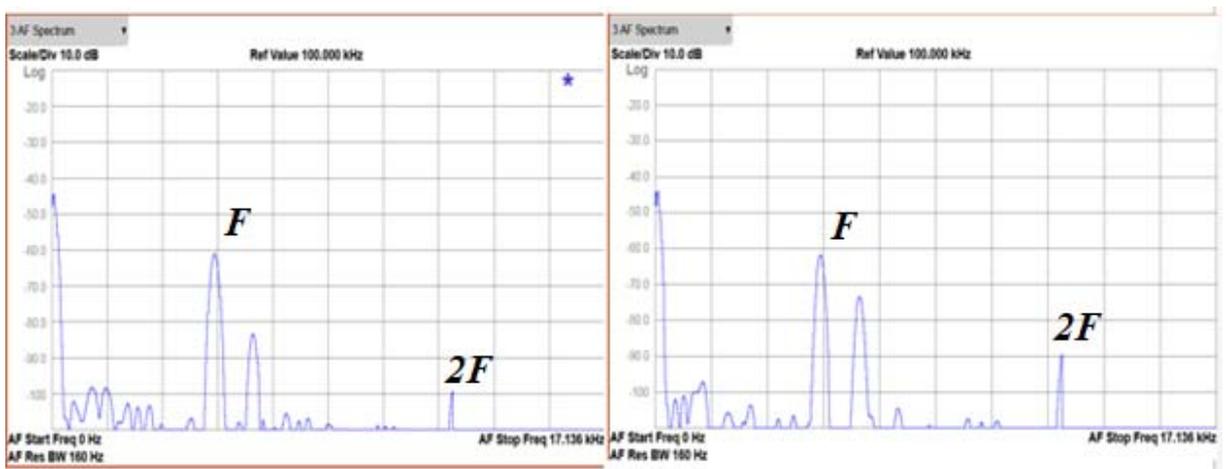
Таблица 4.2.

Антенна	Мощность P на f_0 , дБм	Мощность P на $f_0 \pm F$, дБм	Мощность P на $f_0 \pm 2F$, дБм	Мощность P на $f_0 \pm 3F$, дБм
ПНВА	-29,98	-60,82	-97,23	≤ -100
МНВА	-17,78	-48,61	-76,50	-84,68
Различие ПНВА И МНВА	-12,20	-12,21	-20,73	$\geq -15,32$

С помощью программного обеспечения анализатора сигналов РХА N9030В для детектирования сигнала были исследованы спектры плотности

мощности низкочастотного модулирующего колебания (рисунок 4.3). Из представленных на рисунке спектров видно, что на частоте модулирующего колебания 5 кГц мощность детектированного сигнала для ПНВА и МНВА одинакова и составляет $-62,14$ дБм. Компонента на второй гармонике модулирующего колебания у сигнала от плазменной несимметричной вибраторной антенны на $8,35$ дБ меньше, чем для случая металлической антенны, что косвенно свидетельствует об улучшении соотношения сигнал-шум при излучении ЧМ-сигнала ПНВА.

Таким образом, в рамках проведенного исследования излучения ЧМ-сигнала плазменной и металлической несимметричными вибраторными антеннами было показано, что модулированный сигнал, излучаемый плазменной антенной, не уступает по качеству сигналу от металлической антенны. Мощность нелинейных комбинационных частот в спектре ЧМ-сигнала ПНВА заметно ниже, чем в спектре сигнала, излучаемого МНВА. В спектре детектированного сигнала видно снижение спектральной плотности мощности на второй гармонике частоты модулирующего колебания для сигнала от плазменной антенны в сравнении с сигналом от металлической антенны [10а].



а)

б)

Рисунок 4.3. Спектр плотности мощности низкочастотного модулирующего колебания, излученного а) ПНВА и б) МНВА.

Из анализа экспериментальных данных нельзя сделать однозначного вывода о природе нелинейности ПНВА. Нелинейные искажения могут быть вызваны как нелинейностью частотной характеристики ПНВА, так и нелинейностью плазмы. Для проверки этого предположения было проведено численное моделирование.

4.2. Характеристики излучаемого сигнала ПНВА в численном моделировании

Для оценки влияния характеристик плазмы, при взаимодействии электромагнитной волны с плазмой, на излучаемый сигнал, было проведено численное моделирование в коде КАРАТ с использованием PIC модели плазменной среды (см. параграф 2.3.2) для трёх режимов работы ПНВА [8а, 9а].

Вначале рассмотрим влияние трёх режимов работы ПНВА, описанных в главе 3, на излучаемый сигнал.

На рисунке 4.4 представлены спектры компонент поля E_z и E_r в режиме поверхностной электромагнитной волны. В этом режиме были выбраны следующие параметры плазмы: плазменная частота $f_p = 2 \cdot f_0 = 3,4$ ГГц ($\omega_p = 2 \cdot \omega_0 = 2,14 \cdot 10^{10}$ рад/с), концентрация плазмы $n_e = 1,4 \cdot 10^{11}$ см⁻³. На рисунке 4.4а внутри плазмы рядом с диэлектрической трубкой амплитуда у E_z компоненты есть составляющие на частотах f_0 и $f_p = 2f_0$. Амплитуда E_z компоненты на частоте f_0 в 2 раза больше, чем на ленгмюровской частоте f_p . E_r компонента имеет амплитуду на частоте f_0 в 2 раза меньше, чем амплитуда постоянной составляющей и в 1,5 раза меньше чем амплитуда на частоте f_p . В ближней волновой зоне антенны (рисунок 4.4б) в спектре E_z и E_r есть низкочастотная шумовая составляющая, гармоника несущей частоты f_0 и гармоника ленгмюровской частоты f_p (вторая гармоника несущей частоты сигнала). Наибольшая амплитуда в спектрах компонент E_z и E_r в ближней зоне на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц. Для случая E_z амплитуда на основной гармонике в 5 раз больше, чем амплитуда

постоянной составляющей и в 10 – чем на второй гармонике (плазменной частоте). Для компоненты E_r амплитуда на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц в 1,5 раза больше, чем амплитуда постоянной составляющей и в 15 раз больше, чем амплитуда на частоте $f_p = f_0$. Следует отметить, что амплитуда компоненты E_r для основной гармоники и постоянной составляющей больше, чем амплитуда компоненты E_z .

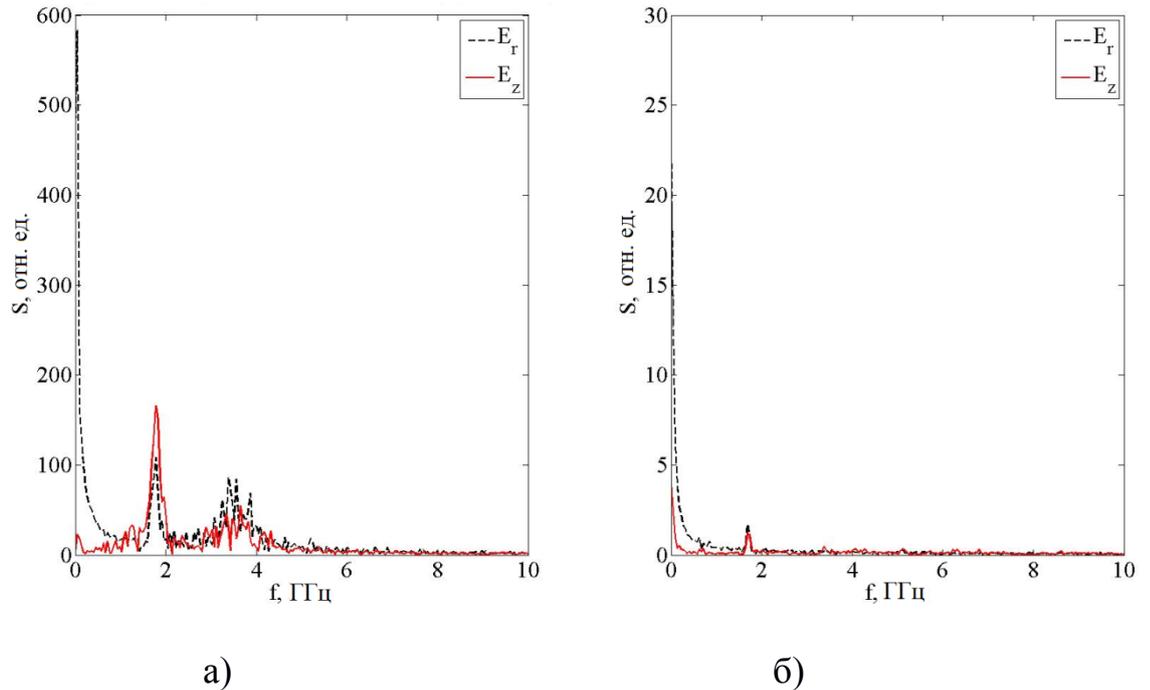


Рисунок 4.4. Спектр E_z и E_r компонент сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной, в режиме поверхностной электромагнитной волны:

а) внутри плазмы, б) в ближней волновой зоне ПНВА.

Спектры компонент E_z и E_r в нелинейном режиме (плазменная частота $f_p = 5 \cdot f_0 = 8,5$ ГГц или $\omega_p = 5 \cdot \omega_0 = 5,35 \cdot 10^{10}$ рад/с, концентрация плазмы $n_e = 9 \cdot 10^{11}$ см⁻³) приведены на рисунке 4.5. На рисунке 4.5а внутри плазмы амплитуды E_z компоненты на частотах f_0 и $2f_0$ заметно больше амплитуд E_r компоненты на этих частотах (в 10 и 2,5 раза соответственно). На частоте f_p амплитуды компонент E_z и E_r совпадают. Амплитуда E_z компоненты на основной гармонике f_0 в 3 раза больше, чем на второй гармонике $2f_0$ и почти в 4 раза чем на ленгмюровской частоте $f_p = 5f_0$. При этом E_r

компонента имеет амплитуду на частоте f_0 в 2 раза меньше, чем на частоте $2f_0$ и в 3 раза меньше – чем на частоте f_p . В ближней волновой зоне антенны (рисунок 4.5б) в спектре E_z и E_r амплитуда на несущей частоте f_0 значительно больше амплитуды второй гармоники (почти в 50 раз). Спектральная составляющая на плазменной частоте в масштабе рисунка 4.5б не видна. Данный случай заметно отличается от режима «поверхностной электромагнитной волны» и можно говорить об излучении сигнала.

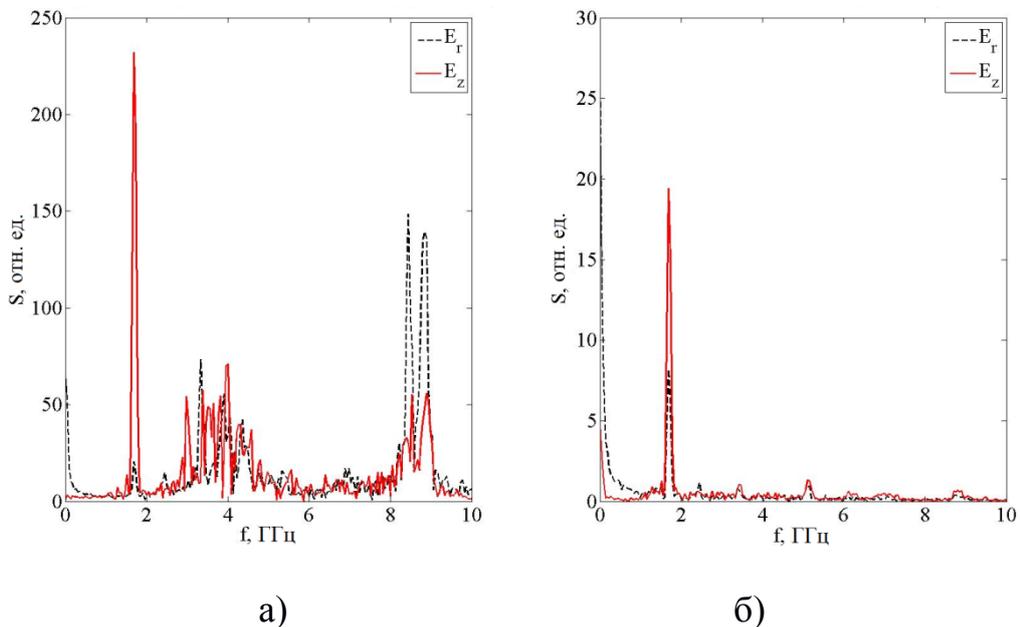


Рисунок 4.5. Спектр E_z и E_r компонент сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной, в нелинейном режиме:

а) внутри плазмы, б) в ближней волновой зоне ПНВА

Для линейного режима (плазменная частота $f_p = 10 \cdot f_0 = 17$ ГГц или $\omega_p = 10 \cdot \omega_0 = 1,1 \cdot 10^{11}$ рад/с, концентрация плазмы $n_e = 3,5 \cdot 10^{12}$ см⁻³) удобно рассматривать спектры компонент E_z и E_r (рисунок 4.6). На рисунке 4.6а внутри плазмы амплитуда E_r компоненты на частоте f_p минимум в 10 раз больше чем амплитуды компонент E_z и E_r на частотах f_0 и $2f_0$, f_p заметно больше амплитуд E_r компоненты на этих частотах (в 10 и 2,5 раза соответственно). На частоте амплитуды компонент E_z и E_r совпадают. Амплитуда E_z компоненты на основной гармонике f_0 в 3 раза больше, чем

на второй гармонике $2f_0$ и почти в 4 раза чем на ленгмюровской частоте $f_p = 5f_0$. При этом E_r компонента имеет амплитуду на частоте f_0 в 2 раза меньше, чем на частоте $2f_0$ и в 3 раза меньше – чем на частоте f_p . В ближней волновой зоне антенны (рисунок 4.6б) в спектре E_z и E_r амплитуда на несущей частоте f_0 значительно больше амплитуды второй гармоники (почти в 50 раз) [5а, 7а, 8а].

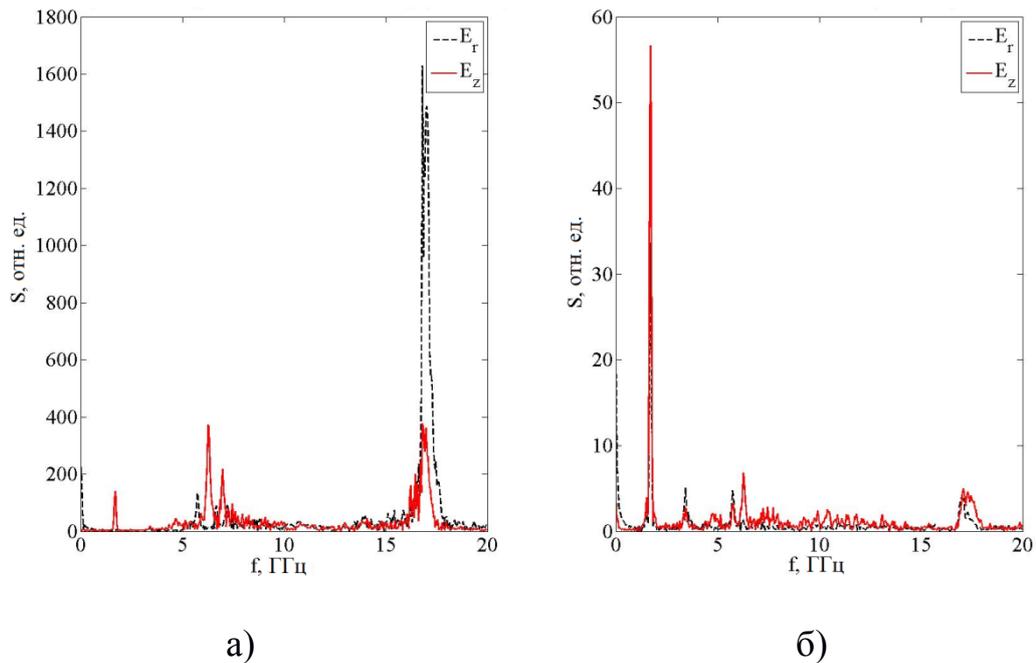


Рисунок 4.6. Спектр E_z и E_r компонент сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной, в линейном режиме:

а) внутри плазмы, б) в ближней волновой зоне ПНВА.

Один из возможных механизмов, объясняющих появление кратных гармоник в спектре излучения ПНВА, связан с колебаниями электронов в сильных электромагнитных полях СВЧ-диапазона частота (энергия осцилляций электрона в таких полях больше, чем потенциал ионизации атомов газа). Это может приводить к изменению распределения тока по длине антенны и, как следствие, процесс ионизации атомов сопровождается эффективной генерацией высоких гармоник электромагнитного поля [119, 120].

Выводы по главе 4

В результате экспериментальных исследований излучения сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенны получены спектры спектральной плотности мощности излучаемого сигнала

Экспериментально обнаружено усиление высших гармоник в спектре немодулированного сигнала при излучении плазменной несимметричной вибраторной антенной, что отличает её от аналогичной металлической антенны [9а, 11а]. С помощью численного моделирования продемонстрировано, что генерация гармоник в спектре немодулированного сигнала слабо связана с амплитудно-частотной характеристикой несимметричной четвертьволновой вибраторной антенны, а в основном обусловлена нелинейностью плазмы. Это демонстрирует также зависимость нелинейности от спектральной плотности мощности входной электромагнитной волны, которая взаимодействует с первоначально невозмущенной плазмой. Генерация кратных гармоник является характерной особенностью работы плазменной антенны, что необходимо учитывать при использовании плазменных антенн в радиотехнических и телекоммуникационных системах. Мощность нелинейных комбинационных частот в спектре узкополосного частотно-модулированного сигнала излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной ниже, чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной. В спектре детектированного сигнала принятого от плазменной антенны мощность на второй гармонике частоты модулирующего колебания меньше чем для сигнала от металлической антенной [5а, 7а, 8а].

Заключение

1. С помощью аналитических методов и численного моделирования по теории Друде выделены три режима работы плазменной несимметричной вибраторной антенны, определяемые по дисперсионному уравнению. Эти режимы зависят от соотношения частоты плазменной волны ω_p и частоты входной электромагнитной волны ω_0 . Режим стоячей поверхностной электромагнитной волны реализуется при $\omega_p \approx \sqrt{2} \cdot \omega_0$, нелинейный – при $\omega_p \approx 5 \cdot \omega_0$, линейный режим – при $\omega_p \geq 10 \cdot \omega_0$. При оптимальном режиме работы ПНВА (линейном) характеристики излучения ПНВА близки к МНВА.

2. В результате экспериментальных измерений диаграмм направленности ПНВА и МНВА получено совпадение направления основных и боковых лепестков ДН и различие в амплитудах ДН (у МНВА амплитуда больше чем у ПНВА).

3. Экспериментально обнаружено, что в линейном режиме в излучении ПНВА присутствуют спектральные составляющие на кратных гармониках входного сигнала с амплитудами отличными от излучения МНВА.

4. С помощью численной PIC-модели плазменной антенны обнаружены нелинейные искажения сигнала в трёх режимах работы, что подтверждается результатами эксперимента.

5. В результате исследования излучения ПНВА узкополосного частотно-модулированного сигнала показано, что в его спектре амплитуды нелинейных комбинационных частот ниже на $20,73 \pm 0,19$ дБ, чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной. В спектре детектированного сигнала, излучаемого плазменной антенной, спектральная плотность мощности на второй гармонике частоты модулирующего колебания меньше на $8,35 \pm 0,19$ дБ, чем для сигнала металлической антенны.

Список литературы

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК:

- 1a. **Bogachev N.N.**, Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Tarakanov V.P. Computer simulation of a plasma vibrator antenna// Acta Polytechnica. – 2013. – Т. 53. – № 2. – С. 110-112. DOI: <https://doi.org/10.14311/1723>
- 2a. **Богачев Н.Н.**, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. Моделирование режимов работы плазменной антенны// Прикладная физика. – 2014. – № 4. – С. 30-34.
- 3a. **Bogachev N.N.**, Bogdankevich I.L., Gusein-Zade N.G., Sergeychev K.F. Operation modes and characteristics of a plasma dipole antenna// Acta Polytechnica. 2015. Т. 55. № 1. С. 34-38. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2015.55.0034>
- 4a. **Богачев Н.Н.**, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Рухадзе А.А. Поверхностная волна и линейный режим работы плазменной антенны// Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 10. С. 860-866. DOI: [10.7868/S0367292115100030](https://doi.org/10.7868/S0367292115100030)
- 5a. **Богачев Н.Н.**, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. Режимы работы плазменной антенны: теория и моделирование//Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 9-3. С. 65-69.
- 6a. **Богачев Н.Н.**, Сергейчев К.Ф. Влияние геометрических размеров и граничных условий на диаграмму направленности и КСВН четвертьволновой несимметричной вибраторной антенны// Инженерная физика. 2016. № 8. С. 74-83.
- 7a. **Богачев Н.Н.**, Андреев С.Е., Гончаров П.Ю. Сигнал плазменной вибраторной антенны в разных режимах работы//Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 9-3. – С. 60-64.
- 8a. **Bogachev N.N.** Simulation of a plasma antenna by PIC method// Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Т. 661. – № 1. – С. 012054.
- 9a. **Bogachev N.N.**, Bogdankevich I.L., Gusein-Zade N.G. Operation modes and signal spectra of plasma asymmetrical dipole antenna// 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – **IEEE**, 2016 – P. 1-4. DOI:[10.1109/EuCAP.2016.7481512](https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481512).
- 10a. **Богачев Н.**, Андреев С., Дёмин В., Гусейн-заде Н., Кириллов А., Калинин О., Филиппов А. Плазменная несимметричная вибраторная антенна: измерение характеристик сигналов// Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2018. – № 1 (172). – С. 88-91.
- 11a. **Богачев Н.Н.**, Гусейн-заде Н.Г., Нефедов В.И. Диаграмма направленности и спектр излучения плазменной несимметричной вибраторной антенны//Физика плазмы. – 2019. – Т. 45. – № 4. – С. 365-368.

Публикации в сборниках трудов и тезисов конференций

- 12а. Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Минаев И.М. Моделирование плазменной и металлической вибраторных антенн// Сборник трудов I-ой международной научно-практической конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» «Радиоинфоком - 2013», часть 2, Москва, март 2013, с. 270-274.
- 13а. Богачев Н.Н. Численные модели плазменного и металлического несимметричных четвертьволновых вибраторов с экранами конечных размеров// Сборник трудов V Всероссийской молодежной конференции «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва, ФИАН, 10-15 ноября 2013 г, с. 166.
- 14а. Богачев Н.Н. Моделирование плазменной и металлической вибраторных антенн FEM и FDTD методами// Доклады 1-ой Всероссийской Микроволновой конференции, Москва, 27-29 ноября 2013 г., с. 180-184
- 15а. Андреев С.Е., Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Нефедов В.И. Сигнал и оптимизация плазменной несимметричной вибраторной антенны// В сборнике: Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017. Сборник научных трудов III Международной конференции. 2017. С. 157.
- 16а. Богачев Н.Н., Андреев С.Е., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Нефёдов В.И. Излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной. В книге: Современные проблемы физики и технологий. тезисы докладов VI Международной молодежной научной школы-конференции, посвященной 75-летию НИЯУ МИФИ и 95-летию академика Н.Г. Басова. 2017. С. 157-158.
- 17а. Богачев Н.Н., Андреев С.Е., Дёмин В.А., Гусейн-заде Н.Г., Кириллов А.В., Калинин О.Н., Филиппов А.Н. Частотно-модулированный сигнал, излучаемый плазменной несимметричной вибраторной антенной// В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. Московский технологический университет (МИРЭА). 2017. С. 458-463.
- 18а. Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г., Нефедов В.И. Диаграмма направленности и спектр излучения плазменной несимметричной вибраторной антенны// В книге: Современные средства диагностики плазмы и их применение. сборник тезисов докладов X Конференции. 2016. С. 25-28.
- 19а. Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Тараканов В.П. Численное моделирование приемной плазменной вибраторной антенны//Тезисы XXXIX Международной звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Москва, февраль 2012,с. 269

- 20a. Bogachev N.N., Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Tarakanov V.P. Computer simulation of a plasma vibrator antenna//25th Symposium on Plasma Physics and Technology, June 2012, Prague, Czech Republic, p. 99
- 21a. Bogachev N.N., Bogdankevich I. L., Gusein-zade N. G., Sergeichev K.F. Operation modes and characteristics of a plasma dipole antenna//27th Symposium on Plasma Physics and Technology, June 2014, Plasma physics and technology, V 1, No 2, Prague, CTU, 2014, p. 83-84.

Патент на изобретение

- 22a. Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Тараканова Е.Н., Сергейчев К.Ф., Трефилов А.Ю. Плазменная вибраторная антенна с ионизацией поверхностной волной// Патент на изобретение RU 2544806 С1, 20.03.2015. Заявка № 2014106756/08 от 24.02.2014.

Используемые публикации

1. Андреев Н.Н., Володин К.С., ЭПР плазменных антенн//Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2009. – № 6. – С. 51-52.
2. Истомин Е. Н., Карфидов Д. М., Минаев И. М., Рухадзе А.А. и др. Плазменный несимметричный вибратор с возбуждением поверхностной волной //Физика плазмы. – 2006. – Т. 32. – №. 5. – С. 423-435.
3. Rayner J. P., Whichello A.P., Cheetham A.D. Physical characteristics of plasma antennas //IEEE Transactions on plasma science.–2004– Т. 32. – №. 1. – С. 269-281.
4. Belyaev B. A. et al. Nonlinear behavior of plasma antenna vibrator //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2014. – Т. 42. – №. 6. – С. 1552-1559.
5. Патент США 1309031. Aerial conductor for wireless signaling and other purposes / Hettinger J. 1919.
6. Капцов Н.А. Электроника: Учебное пособие. – М.: Гостехиздат, 1953.
7. Патент США 2760055. Antenna of ionized air / Laste C.– 1956
8. Патент США 3404403. Laser beam antenna / Vallese L. M., Arnold S. – 1968.

9. Kononov B. P., Solodukhin G. V., Rukhadze A. A. Electric field of a radiator in a plasma in an external magnetic field // Soviet Physics-Technical Physics. – 1961. – Т. 6. – №. 5. – С. 405.
10. Balmain K. The impedance of a short dipole antenna in a magnetoplasma //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1964. – Т. 12. – №. 5. – С. 605-617.
11. Wang T. N. C., Bell T. F. Radiation resistance of a short dipole immersed in a cold magnetoionic medium //Radio Science. – 1969. – Т. 4. – №. 2. – С. 167-177.
12. Lee S. W. Cylindrical antenna in uniaxial resonant plasmas //Radio Science. – 1969. – Т. 4. – №. 2. – С. 179-189.
13. Chugunov Y. V. The theory of a thin metal antenna in anisotropic media // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1969. – Т. 12. – №. 6. – С. 661-664.
14. Lee S., Lo Y. Current distribution and input admittance of an infinite cylindrical antenna in anisotropic plasma //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1967. – Т. 15. – №. 2. – С. 244-252.
15. Ким А. В., Марков Г. А., Смирнов А. И., Умнов А. Л. Плазменная антенна-генератор //Письма в ЖТФ. – 1989. – Т. 15. – №. 5. – С. 34-37.
16. Костров А.В., Пахотин В.А., Смирнов А. И., Стародубцев М. В. Влияние замагниченной плазменной оболочки на эффективность излучения короткой антенны // Физика плазмы. – 1995. – Т. 21. – №5. – С. 460-462.
17. Пахотин В.А. Излучение электрически короткой антенны из ограниченного объёма газоразрядной плазмы // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33. – № 8. – С. 22-29.
18. Заборонкова Т. М., Кудрин А. В., Петров Е. Ю. К теории рамочной антенны в анизотропной плазме //Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1998. – Т. 41. – №. 3. – С. 358-373.

19. Kudrin A. V., Es'kin V. A., Krafft C., Zaboronkova T. M. Whistler wave excitation by a loop antenna in a bounded collisional magnetoplasma // *Phys. Scripta*. – 2008. – V. 77. – No. 5. – P. 055501-1-055501-11.
20. Заборонкова Т. М., Кудрин А. В., Петров Е.Ю. Электродинамические характеристики ленточной антенны в магнитоактивной плазме // *Радиотехника и электроника*. 2012. Т. 57, №3. С. 325-329.
21. Kudrin A. V., Zaitseva A.S., Zaboronkova T. M., Krafft C., Kyriacou G.A. Theory of a strip loop antenna located on the surface of an axially magnetized plasma column // *Progress in Electromagnetics Research B*. – 2013. – V. 51. – P. 221-246.
22. Shirokov E. A. Computations of the input impedance of antennas in cold magnetoplasmas in nongyrotropic and quasi-stationary cases using the method of moments // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2015. V. 63, № 12. P. 5846–5849.
23. Fathy, A. E., Rosen, A., Owen, H. S., McGinty, F., McGee, D. J., Taylor, G. C. et al. Silicon-based reconfigurable antennas-concepts, analysis, implementation, and feasibility // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2003. – T. 51. – №. 6. – С. 1650-1661.
24. Kim D.J., Jo E.S., Cho Y.K., Hur J., Kim C.K., Kim, C. H., ... & Choi Y.K. Frequency reconfigurable dipole antenna with solid-state plasma in silicon // *Scientific reports*. – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 1-8.
25. Агафонов Ю. Н. Башилов, Г. В., Марков, Г. А., Чугунов, Ю. В. . Активная плазменная антенна в ионосфере Земли // *Геомагнетизм и аэронавигация*. – 1996. – Т. 36. – №. 4. – С. 206-211.
26. Колычев С.А., Ярыгин А.П. Оценка влияния расширения приосевого канала рефрактора плазменной антенны на его характеристики направленности // *Антенны*. –2011. –№12. – С. 26-30.
27. Minin I.V., Minin O.V. The possibility of impulse plasma antenna creation // *Proc. of the 6th Russian-Korean Int. Symp. On Science and Technology*, June 24-30, 2002, Novosibirsk, Russia, v.2, p. 289–292.

28. Патент РФ 2255394. Плазменная приемопередающая антенна /Гришин В.А., Пащина А. С., Николаева В.И. – 2003.
29. Shkilyov A.L., Khristenko V.M., Somov V.A., Tkach Yu.V. Experimental Research of the Explosive Plasma Antenna // *Electromagnetic Phenomena* 2003. – V.3. – No.4 (12). – P. 521-528
30. Novikov V. E., Puzanov O. O., Sin'kov V. V., Soshenko V. A.. Physical Prerequisites to the Plasma Antenna Development // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2004. – Т. 61. – №. 7-12.
31. Adzhiev A. H., Soshenko V. A., Sytnik O. V., Tishchenko, A. S. Experimental investigation of explosive plasma antennas // *Technical Physics*. – 2007. – Т. 52. – №. 6. – С. 765-769.
32. Puzanov A. O. Skin-Layer Impedance of an Explosion-Produced Plasma Column in Free Space // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2008. – Т. 67. – №. 8.
33. Пащина А. С., Дегтярь В. Г., Калашников С. Т. СВЧ-антенна на основе импульсной плазменной струи // *Теплофизика высоких температур*. – 2015. – Т. 53. – №. 6. – С. 839-850.
34. Аскарьян Г. А., Раевский И. М. Возбуждение высокочастотных колебаний импульсом лазера // *Письма ЖЭТФ*. – 1980. – Т. 32. – № 2. – С. 115-119.
35. Brelet Y. et al. Radiofrequency plasma antenna generated by femtosecond laser filaments in air // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 101. – No. 26. – P. 264106.
36. Choe Y. S., Hao Z., Lin J. Radiation characteristics of femtosecond laser-induced plasma channel Vee antenna // *Physics of Plasmas*. – 2015. – V. 22. – No. 6. – P. 063302.
37. Hong H., Choe Y. S. Strong effect of outer plasma layers of femtosecond laser-induced plasma-channel antenna and its metallic counterpart on their radiation // *Applied Physics B*. – 2019. – V. 125. – No. 1. – P. 1-9.

38. Robson A. E., Morgan R. L., Meger R. A. Demonstration of a plasma mirror for microwaves //IEEE transactions on plasma science. – 1992. – V. 20. – No. 6. – P. 1036-1040.
39. Kudrin A. V., Ivoninsky A. V., Es'kin V. A. Electromagnetic resonance scattering by an array of magnetized plasma cylinders //2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2016. – P. 1-4.
40. Третьяков Д. В. Искровая плазменная антенна //Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – №. 7. – С. 867-873.
41. Заявка на патент РФ 94039011/09. Антенна Крымского-Шульженко. Крымский В.В., Шульженко Г.И. 10.10.1994.
42. Бухарин В.А., Крымский В.В. Плазменные излучатели нестационарных электромагнитных полей. Препринт.-Челябинск, Изд. ЧГТУ, 1995 г. – 25 с.
43. Borg G. G., Harris J. H., Miljak D. G., Martin N. M. Application of plasma columns to radiofrequency antennas //Applied physics letters. – 1999. – V. 74. – No. 22. – P. 3272-3274.
44. Borg G. G. et al. Plasmas as antennas: Theory, experiment and applications //Physics of Plasmas. – 2000. – V. 7. – No. 5. – P. 2198-2202.
45. Kang W. L., Rader M., Alexeff I. A conceptual study of stealth plasma antenna //IEEE Conference Record-Abstracts. 1996 IEEE International Conference on Plasma Science. – IEEE, 1996. – P. 261.
46. Alexeff I. et al. A plasma stealth antenna for the US Navy //25th Anniversary, IEEE Conference Record-Abstracts. 1998 IEEE International Conference on Plasma Science (Cat. No. 98CH36221). – IEEE, 1998. –P. 277.
47. Alexeff I., Anderson T., Parameswaran S., et al. Experimental and theoretical results with plasma antennas //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2006. – Т. 34. – №. 2. – С. 166-172.

48. Овсяников В.В. Широкополосный СВЧ излучатель на основе плазмы газового разряда//Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6 – № 3. – С. 261-267.
49. Овсяников В. В., Бухаров С. В., Мороз С. Н. Петлевые плазменные и металлические антенны для мобильных объектов //Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57. – №. 3. – С. 19-32.
50. Hargreave M., Rayner J. P., Cheetham A. D., French G. N., Whichello A. P. Coupling power and information to a plasma antenna //AIP Conference Proceedings. – 2003. – V. 669. – No. 1. – P. 388-391.
51. Rayner J. P., Whichello A. P., Cheetham A. D. Physical characteristics of plasma antennas //IEEE Transactions on plasma science. – 2004. – V. 32. – No 1. – P. 269-281.
52. Минаев И. М., Рухадзе А.А., Сергейчев К. Ф., Трефилов А.Ю. Активная плазменная ВЧ-антенна, самосогласованная с источником колебаний //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2005. – №. 12. – С. 34-44.
53. Истомин Е. Н., Карфидов Д. М., Минаев И. М., Рухадзе А.А. и др. Плазменный несимметричный вибратор с возбуждением поверхностной волной //Физика плазмы. – 2006. – Т. 32. – №. 5. – С. 423-435.
54. Chung M., Chen W. S., Huang B. R., Chang C. C., Ku K. Y., Yu Y. H., Suen T. W. Capacitive coupling return loss of a new pre-ionized monopole plasma antenna //TENCON 2007-2007 IEEE Region 10 Conference. – IEEE, 2007. – С. 1-4.
55. Chao L., Yue-Min X., Zhi-Jiang W. Numerical simulation of plasma antenna with FDTD method //Chinese Physics Letters. – 2008. – Т. 25. – №. 10. – С. 3712.

56. Минаев И. М., Гусейн-заде Н. Г., Рухадзе К. З. Плазменная приемная вибраторная антенна //Физика плазмы. – 2010. – Т. 36. – №. 10. – С. 972-974.
57. Kumar R., Bora D. Experimental study of parameters of a plasma antenna //Plasma Science and Technology. – 2010. – Т. 12. – №. 5. – С. 592.
58. Ye H. Q., Gao M., Tang C. J. Radiation theory of the plasma antenna //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – Т. 59. – №. 5. – С. 1497-1502.
59. Sadeghikia F., Hodjat-Kashani F., Rashed-Mohassel J., et al. Characterization of a surface wave driven plasma monopole antenna //Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2012. – Т. 26. – №. 2-3. – С. 239-250.
60. Zhu A., Chen Z., Lv J. Reconfigurable characteristics of the monopole plasma antenna and its array driven by surface wave //WSEAS Transactions on Communication. – 2013. – V. 12. – No. 4. – P. 143-153.
61. Zhao J. S. et al. Radiation characteristics and electromagnetic compatibility of 5-20 KHz ac plasma antenna //Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – V. 418. – No. 1. – P. 012056.
62. Vachkov V., Kiss'ovski Z. Miniature microwave plasma antenna at 2.45 GHz //The European Physical Journal: Applied Physics. – 2015. – Т. 72. – №. 3. – С. 30801.
63. Володин К.С., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Рухадзе К.З., Сергейчев К.Ф., Плазменное управление диаграммой направленности волноводно-щелевой антенны // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2009. – № 6. – С. 36-38.
64. Гусейн-заде Н. Г., Минаев И. М., Рухадзе А. А., Рухадзе К. З. Физические принципы вибраторных и щелевых плазменных антенн //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2011. – №. 3. – С. 42–49.

65. Гусейн-заде Н. Г., Минаев И. М., Рухадзе А. А., Рухадзе К. З. Физические принципы работы плазменных антенн //Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56. – №. 10. – С. 1216-1220.
66. Минаев И. М., Сергейчев К. Ф. Плазменные антенные решетки (волноводно-щелевые и вибраторные) //Труды ИОФАН. – 2014. – Т. 70. – С. 186-213.
67. Manheimer W. M. Plasma reflectors for electronic beam steering in radar systems //IEEE Transactions on Plasma Science. – 1991. – Т. 19. – №. 6. – С. 1228-1234.
68. Mathew J. et al. Electronically steerable plasma mirror for radar applications //Proceedings International Radar Conference. – IEEE, 1995. – P. 742-747.
69. Сергейчев К. Ф., Лукина Н. А., Фесенко А. А. Долгоживущая Ar Hg-плазма в послесвечении импульсного разряда с большим током //Физика плазмы. – 2013. – Т. 39. – №. 2. – С. 168-168.
70. Войтович Н. И., Соколов А. Н. Вибраторные антенны //Учебное пособие.—Челябинск: Изд. ЮурГУ. – 2001.
71. Айзенберг Г. З. Антенны ультракоротких волн. – 1957.
72. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов / под ред. Д.И. Воскресенского. // М. : “Сов. радио” – 1972.
73. Захарьев Л. Н., Леманский А. А., Турчин В. И. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. – Радио и связь, 1985.
74. Ерохин Г. А. и др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн/ Ерохин, Г. А., Чернышев, О. В., Козырев, Н. Д., Кочержевский, В. Г.// Учебник для вузов / М: НТИ «Горячая линия – Телеком» – 2007.
75. Рухадзе К. З. Антенные устройства на основе плазменных технологий: дис. к.т.н. – Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, 2011.

76. Lorentz H. A. Electromentheorie der Metalle. – Leipzig. – 1909.
77. Sommerfeld A. Zur elektronentheorie der metalle //Naturwissenschaften. – 1927. – Т. 15. – №. 41. – С. 825-832.
78. Bardeen J. Electrical conductivity of metals //Journal of Applied Physics. – 1940. – Т. 11. – №. 2. – С. 88-111.
79. Рухадзе А. А. Об условиях применимости формулы Друде //Инженерная физика. – 2014. – №. 1. – С. 27-31.
80. Sommerfeld A. Uber die Fortpflanzung elektrodynamischer Wellen langs eines Drahtes // Ann. Phys. Chem. – 1899. – V. 67. – P. 233–290.
81. Trivelpiece A.W. Slow wave propagation in plasma waveguides// The DP-degree Thesis. – California Institute of Technology. –1958. – 140 p.
82. Granatstein V.L., Schlesinger S.P., Vigants A. The open plasma guide in extremes of magnetic field // IEEE Trans. Antennas Prop. – 1963. – V. 11. – P. 489–496.
83. Diamant P., Granatstein V.L., Schlesinger S.P. Wave propagation along warm plasma columns // J. Appl. Phys. –1966. – V. 7. P. 1771–1778.
84. Tuma D.R. A quiet uniform microwave gas discharge for lasers // Rev. Sci. Instrum. –1970. –V. 41. –P. 1519–1520.
85. Аланакян Ю.Р. К теории поверхностных волн в плазме // ЖТФ. – 1967. – Т. 37. – С. 817–821.
86. Moisan M., Beaudry C., Leprince P. A new HF device for the production of long plasma columns at high electron density // Phys. Lett. –1974. –V. 5. –P. 125–126.
87. Moisan M., Shivarova A., Trivelpiece A.W. Experimental investigations of the propagation of surface waves along a plasma column // Plasma Phys. – 1982. –V. 24, N 11. –P. 1331–1400.
88. Ferreira C.M., Moisan M. The similarity laws for the maintenance field and the absorbed power per electron in low-pressure surface wave produced plasmas and their extension to HF plasmas in general // Physica Scripta. – 1988. –V. 38. –P. 382–399.

89. Zhelyazkov I., Atanassov V. Axial structure of low pressure high frequency discharges, sustained by travelling electromagnetic surface wave // *Phys. Rep.* –1995. –V. 255. – P. 79–201.
90. Grosse S., Georgieva-Grosse M., Ghanashev I., Schluter M.J. Influence of transversal plasma density nonuniformity and collisions on surface wave propagation // *Electromag. Waves Appl.* – 1997. – V. 11. – P. 609–632.
91. Aliev Yu.M., Schluter H., Shivarova A. *Guided-Wave-Produced Plasmas* / Ed. by G. Ecker. Berlin: Springer. –2000. –P. 291.
92. Минаев И. М. и др. ВЧ пробой газа поверхностной волной при безэлектродном возбуждении плазменного канала плазменной антенны // *Прикладная радиоэлектроника.* – 2012. – №. 11, № 4. – С. 476-481.
93. Anderson T. *Plasma antennas*// Artech House. 2011.
94. Naito T. et al. Theoretical and experimental investigation of plasma antenna characteristics on the basis of gaseous collisionality and electron density // *Japanese Journal of Applied Physics.* – 2014. – V. 54. – No. 1. – P. 016001.
95. Naito T., Yamaura S., Fukuma Y., Sakai O. . Radiation characteristics of input power from surface wave sustained plasma antenna // *Physics of Plasmas.* – 2016. – V. 23. – No. 9. – P. 093504.
96. Коновалов В. Н. Кузьмин Г. П., Минаев И. М., Рухадзе А. А., Тихоневич О. В. Спектральные характеристики плазменных антенн // *XLI Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, сборник тезисов, Звенигород.* – 2014. – С. 274.
97. Belyaev B. A., Leksikov A. A., Leksikov A. A., Serzhantov A. M., Bal'va Y. F. Nonlinear behavior of plasma antenna vibrator // *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2014. – V. 42. – No. 6. – P. 1552-1559.
98. Банков С. Е., Курушин А. А. *Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР* // М.: Солон-Пресс. – 2008. – 276 С.

99. Банков С.Е., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS. - М. 2009.
100. About EMPro // Keysight Technologies URL: <http://www.keysight.com/en/pc-1297143/EMPro> (дата обращения: 12.10.2019).
101. Tarakanov V. P. User's manual for code KARAT //Springfield: BRA. – 1992.
102. Тараканов В.П. Универсальный электромагнитный код КАРАТ, в кн.: Математическое моделирование. Проблемы и результаты. – М., Наука, 2003, с.456-476.
103. Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. Моделирование радиофизических процессов. Часть 2: Учебное пособие. – М.: МГТУ МИРЭА. – 2013 – 80 с.
104. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах.– М.: Физматгиз. 1963. – 368 с.
105. Головченко Г. С., Дубровин В. Ф. Измерение характеристик СВЧ-трактов /. — М.: МИРЭА, 2004. — 91 с.:
106. Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ : Учеб. пособие для вузов. — М.: Радиотехника, 2008. — 183 с.
107. Компания Keysight Technologies. Анализатор сигналов РХА серии X N9030A. Технические данные // URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-02142/data-sheets/5990-3952.pdf> (дата обращения: 12.10.2019).
108. Berenger J. P. Improved PML for the FDTD solution of wave-structure interaction problems //IEEE transactions on Antennas and Propagation. – 1997. – V. 45. – No. 3. – P. 466-473.
109. Харлоу Ф. Х. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики // Вычислительные методы в гидродинамике. — М.: Мир, 1967, 460 с.
110. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. - М.: Мир, 1987.

111. Вшивков В. А., Маркелова Т. В., Шелехов В. И. Об алгоритмах сортировки в методе частиц в ячейках //Системы анализа и обработки данных. – 2008. – №. 4. – С. 79-92.
112. Сергейчев К. Ф., Минаев И. М. Плазменные антенны на поверхностных электромагнитных волнах //Труды ИОФАН. – 2014. – Т. 70. – С. 143-185.
113. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. – М.: Наука, 1966. – 240. С.
114. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. – М.: Связь. – 1973. – 480. С.
115. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Лекции по электродинамике плазмopodobных сред. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1999.
116. Карташов И. Н., Кузелев М. В. Диссипативные поверхностные волны в плазме //Физика плазмы. – 2014. – Т. 40. – №. 8. – С. 749-749.
117. Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Рухадзе К.З. Физические принципы вибраторных и щелевых плазменных антенн //Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2011. – №. 3.– С. 42.
118. Cheung C. K., Keough G. E., Gross R. H., Landraitis, C. Getting started with Mathematica. – Wiley, 2005.
119. Горбунов Л. М. Введение в электродинамику плазмы: Учебное пособие. – М.: Изд-во Ун-та дружбы народов, 1990. – 127 с.
120. Кузелев М. В., Омаров О. А., Рухадзе А. А. Микроволновой и оптический пробой газов и генерация гармоник поля//Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2012. – №. 1.– С. 3-11.