

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Богачева Николая Николаевича «Режимы работы и излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы

История исследований плазменных антенн насчитывает более ста лет. В 1919 году в США был получен первый патент на плазменную антенну. В последние 30 лет наблюдается наибольшая активность в разработке и исследовании этих устройств. В плазменных антеннах плазма может использоваться как излучающий, волноведущий или управляющий элемент. При большом многообразии типов и конструкций плазменных антенн наибольший интерес и практическую ценность представляют лазерные и полупроводниковые плазменные антенны, а также плазменные антенны на газоразрядных трубках. Различные виды газоразрядных плазменных антенн теоретически, численными методами и экспериментально исследуются в ИОФ РАН уже почти 20 лет. Среди них больше всего работ посвящено плазменной несимметричной вибраторной антенне (ПНВА), являющейся аналогом металлической несимметричной вибраторной антенны. ПНВА состоит из плазменной газоразрядной трубки и экрана в виде металлического диска.

Отличительной особенностью плазменных антенн является возможность электронного управления их характеристиками, малая радиолокационная заметность, быстрое включение/выключение, возможность улучшения электромагнитной совместимости. Всё вышперечисленное обуславливает **актуальность** выполненного исследования и диссертационной работы

Объектом диссертационного исследования является плазменная несимметричная вибраторная антенна.

По структуре диссертация Богачева Н.Н. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы и приведено краткое изложение основных разделов диссертации. На защиту вынесено три положения, отражающих основные результаты исследования.

В **первой главе** представлен обзор основных исследований по применению плазменных технологий в антенных устройствах, проведена классификация плазменных антенн. Особое внимание в обзоре было уделено плазменным антеннам из газоразрядных трубок, к которым относится исследуемая в диссертации плазменная несимметричная вибраторная антенна. В конце главы описаны схема и особенности выбранной конструкции антенны.

Вторая глава посвящена методам численного и экспериментального исследования характеристик плазменной антенны. Достаточно подробно рассмотрены основные численные методы и программы для моделирования антенн. В главе представлены результаты верификации и обоснование выбора электродинамического кода КАРАТ для численного моделирования, описание численных моделей ПНВА. Кроме того, приведены методика эксперимента и схема лабораторного стенда, использованных при измерении

диаграмм направленности и спектров излучения плазменной и металлической несимметричных вибраторных антенн.

Третья глава посвящена теоретическому и численному исследованию режимов работы и характеристик плазменной несимметричной вибраторной антенны. В начале главы приведено общее описание распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре, приведены численные решения дисперсионного уравнения поверхностной электромагнитной волны на цилиндре конечного радиуса при вариации электронной концентрации и частоты столкновений в плазме. На основе полученных дисперсионных кривых демонстрируется существование трёх режимов распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса. Далее представлены результаты исследования распределения компонент напряженности электрического поля в ближней волновой зоне антенны, демонстрирующие существование трёх режимов работы плазменной антенны: режима поверхностной электромагнитной волны, нелинейного и линейного режимов, определяемых по дисперсионной кривой. В конце главы проводится сравнение расчетных диаграмм направленности плазменной антенны в трёх режимах работы антенн с результатами экспериментальных измерений.

В четвёртой главе представлены результаты численного моделирования и экспериментальных измерений спектральных характеристик немодулированного и модулированного сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной. По результатам сравнения со спектральными характеристиками металлической вибраторной антенны продемонстрировано усиление высокочастотных гармоник в спектре изучаемого плазменной антенной немодулированного сигнала. Кратко описаны возможные причины обнаруженного явления. Также экспериментально продемонстрировано, что плазменная антенна по качеству излучения частотно-модулированного сигнала не уступает металлической антенне.

В заключении кратко перечислены основные результаты диссертационной работы.

Библиография включает 120 источников, что говорит о широком добросовестном обзоре исследований по плазменным антеннам в диссертации.

Достоверность представленных в диссертации результатов численного моделирования и вытекающих из них выводов обусловлена применяемыми современными математическими методами и хорошей согласованностью эмпирических данных и численного моделирования. Все разработанные модели и комплексы программ были тщательно проверены на широком круге тестовых задач. Кроме того, результаты данного исследования хорошо согласуются с другими работами по данной тематике.

Практическая ценность 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 C1, 20.03.2015 «Плазменная вибраторная антенна с ионизацией поверхностной волной».

Новизна научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. Среди интересных **новых научных результатов** можно отметить следующие:

- С помощью численного моделирования впервые были обнаружены три разных режима работы плазменной несимметричной вибраторной антенны (режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный режимы); 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.

Все представленные в диссертации результаты получены автором **самостоятельно или при его непосредственном участии**. Автор участвовал в постановке задачи, планировании и проведении экспериментов и, естественно, анализе получаемых результатов. Представленные в диссертации численные расчеты выполнялись лично автором или при его непосредственном участии. Результаты экспериментальных исследований получены лично диссертантом.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, из которых 7 входят в международные базы данных WoS и SCOPUS. Получен 1 патент РФ на изобретение. Результаты диссертационных исследований неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях (11 докладов), а также на научных семинарах ИОФ РАН и РТУ МИРЭА.

Основная часть диссертационного исследования **соответствует паспорту научной специальности 1.3.9 – Физика плазмы**, а именно пунктам 3 и 12.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что она выполнена на высоком научном уровне.

В качестве замечаний, помимо небольших оформительских проблем (погрешности в стиле изложения и терминологии, а также иногда встречающиеся опечатки и грамматические ошибки), необходимо отметить следующие:

- В первой главе диссертации проведен широкий обзор различных плазменных антенн, но конкретная конструкция исследуемой плазменной несимметричной вибраторной антенны описана недостаточно подробно. Также слабо подчеркнуты преимущества плазменных антенн.
- В рамках диссертационного исследования не показана зависимость эффективности излучения плазменной несимметричной вибраторной антенны от мощности генератора.
- В третьей главе указано, что «электронная концентрация в плазме газового разряда в люминесцентной лампе ПНВА по оценкам находится в диапазоне $n_e \approx 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ », однако в тексте нет обоснования сделанных оценок.
- В диссертации есть путаница между двумя терминами «мощность» и «плотность потока мощности», в описании результатов экспериментальных исследований и численного моделирования иногда некорректно используется термин «мощность» вместо «плотности потока мощности».

- В четвертой главе недостаточно подробно дано физическое объяснение полученных результатов экспериментов и моделирования.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные теоретические и практические результаты. Эти замечания никоим образом не снижают ценности диссертации и ее высокой оценки.

Заключение

Существенных замечаний нет. Большая часть из них является рекомендациями для дальнейших исследований и не снижает ценность выполненных исследований. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой, обладающей внутренним единством и целостностью.

Автор продемонстрировал высокий уровень владения, как экспериментальными методами, так и методами численного моделирования. Богачев Н.Н. внес значительный вклад в исследование плазменных антенн. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития физики плазмы.

Диссертация «Режимы работы и излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной» полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а ее автор Богачев Николай Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник Отдела магнитных систем Отделения магнитных и оптических исследований АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
доктор физико-математических наук.

15.11.2021.

Раваев Александр Александрович

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Полный адрес работы: Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12

Телефон: [17 \(495\) 841-53-09](tel:+74958415309)

E-mail: ravaev@triniti.ru

Подпись Раваева А.А. заверяю

Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»



А. А. Ежов