

Отзыв

на автореферат диссертации Гаштури Антона Петровича на тему «Анализ и синтез квазиоптических преобразователей гироприборов методами интегральных уравнений», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Гиротрон является источником мощного электромагнитного излучения в СВЧ и терагерцевом диапазоне и широко используется в различных научных и технологических приложениях, в том числе для нагрева и диагностики плазмы, радиолокации, в приборах спектроскопии, медицинских целях, в технологических системах для нагрева и сушки различных материалов, а также в других приложениях. К числу важнейших элементов конструкции гиротронов относятся системы вывода генерируемого излучения, в качестве которых выступают волноводные и квазиоптические линии с большим отношением размера к рабочей длине волны. Достижение высокой степени преобразования рабочей моды в пространстве взаимодействия в моду выходного излучения в форме гауссова пучка в свободном пространстве имеет критическое значение для работы гиротрона, поскольку высокая мощность генерации приводит к существенным дифракционным потерям даже при небольшом снижении эффективности преобразования.

В настоящее время для конструирования волноводных преобразователей гиротронов используются методы, базирующиеся на прямом численном моделировании уравнений, описывающих распространение и преобразование электромагнитных волн в открытых электродинамических структурах. С учетом сверхразмерности систем ввода и вывода излучения в мощных СВЧ устройствах подобное моделирование требует разработки сложных вычислительных методик, а также использования мощных компьютерных ресурсов. Эти требования существенно возрастают, если речь заходит о решении задач синтеза подобных систем.

На современном этапе развития вычислительной электродинамики общепризнано, что наиболее эффективными способами решения задач дифракции являются методики, базирующиеся на решении интегральных уравнений различного типа, получаемых из уравнений Максвелла и сформулированных относительно различных полевых величин, определенных на металлических поверхностях, присутствующих в анализируемой системе, в данном случае, на поверхности волноводного преобразователя. Однако выбор типа интегрального уравнения и векторной функции, для которой оно будет сформулировано, остается нетривиальной задачей. Кроме того, оказывается, что при решении задачи дифракции использование различных приближений может существенно упростить методику и одновременно повысить эффективность решения сформулированных уравнений при сохранении необходимой для практики точности получаемых результатов.

В связи с этим, диссертационная работа Гаштури А.П., посвященная развитию метода интегрального уравнения для анализа и синтеза открытых волноводных преобразователей в мощных генераторах СВЧ излучения, а также разработке с использованием этого метода новых типов гиротронных преобразователей, несомненно является **актуальной**.

В процессе работы автор получил ряд **новых** научных результатов, из которых наибольший интерес, на наш взгляд, представляют следующие.

Развит новый метод численного анализа и синтеза волноводных преобразователей, используемых в современных гироприборах. Метод основан на интегральном уравнении, которому должно удовлетворять распределение вектора электрического тока на поверхности волноводного преобразователя;

На основе разработанной методики создана программа анализа и синтеза волноводных преобразователей, основанная на решении интегрального уравнения электрического поля методом граничных элементов. Программа использована при создании выходных

устройств мощных гиротронов, работающих в различных диапазонах частот. В частности, разработан волноводный преобразователь, предназначенный для вывода излучения из гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц, изготовлены образцы волноводного преобразователя для этого гиротрона, для чего были использованы две различные технологии. Проведенные измерения параметров преобразователей продемонстрировали их высокую эффективность, а также хорошее совпадение измеренных экспериментально параметров изготовленных преобразователей между собой, а также с данными численного моделирования.

Разработан высокоэффективный вариант многочастотного метода синтеза, на основе которого создан двунаправленный квазиоптический преобразователь для многочастотного гиротрона диапазона 175-250 ГГц. Численное моделирование показывает, что преобразователь обеспечивает эффективный вывод энергии для пяти рабочих мод гиротрона в указанном диапазоне с малым уровнем дифракционных потерь.

Реализован быстрый численный метод синтеза волноводного преобразователя для излучателя с узким спектром углового распределения рабочей моды, основанный на решении приближенных уравнений итерационной физической оптики с заменой профиля излучателя на соответствующий ему фазовый множитель. Такое приближение позволяет свести интегральное уравнение для вектора тока на поверхности преобразователя к двум связанным скалярным интегральным уравнениям, в которых оба интеграла являются свертками, что позволяет использовать для их вычисления высокоэффективный метод быстрого преобразования Фурье. В результате скорость вычислений при решении системы интегральных уравнений повышается на два порядка.

Достоверность полученных результатов и вынесенных на защиту научных положений подтверждена:

- использованием современных численных методов вычислительной электродинамики, предназначенных для 3-D моделирования электромагнитных полей в системах, содержащих открытые электродинамические структуры.

- полученным для разработанных волноводных преобразователей хорошим совпадением результатов экспериментальных измерений с результатами численного моделирования методом интегрального уравнения.

- соответствием между собой результатов моделирования электромагнитных полей в волноводных преобразователях, полученных с использованием численных подходов различного уровня сложности (строгий метод граничных элементов на основе интегрального уравнения электрического поля и быстрый метод, базирующийся на приближенных уравнениях итерационной физической оптики).

Практическая значимость Гаштури А.П. состоит в следующем:

- результаты, полученные в диссертации, развивают методы вычислительной электродинамики, предназначенные для моделирования электромагнитных колебаний и волн в закрытых и открытых электродинамических структурах.

- результаты представленных исследований использованы при разработке новых типов квазиоптических систем гиротронов в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн.

- разработанная в процессе выполнения диссертации программа для анализа и синтеза волноводных преобразователей интегрирована в пакет ANGEL, который активно используется при разработке новых типов гироприборов с улучшенными характеристиками.

В качестве **замечания** по тексту автореферата диссертации Гаштуни А.П. отметим следующее.

На стр. 9 автореферата написано, что используемое в диссертации для моделирования электромагнитного поля интегральное уравнение электрического поля представляет собой уравнение Фредгольма первого рода, решение которого может быть численно неустойчивым. Однако в тексте автореферата не содержится сведений о том, в

каких случаях можно ожидать появления такой неустойчивости и каким образом она может быть подавлена. Указанное замечание носит частный характер и не снижает ценность представленной работы.

В целом диссертационная работа является завершенным научным исследованием, содержащим новые научные результаты, имеющие существенное значение для проектирования и разработки новых мощных генераторов СВЧ и терагерцевого диапазонов. Тема диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.3.4. – Радиофизика; автореферат достаточно полно отражает её содержание. Основные результаты в полной мере опубликованы в научной печати.

Судя по содержанию автореферата, диссертационная работа Гаштури Антона Петровича полностью удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 с изменениями и дополнениями. Автор работы заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

доктор физико-математических наук
(специальности 01.04.03–Радиофизика и
01.04.04–Физическая электроника),
профессор, главный научный сотрудник,
Саратовский филиал ФГБУН ИРЭ им.
В.А. Котельникова РАН

Рыскин Никита Михайлович

Адрес: 410038, г. Саратов, ул. Зеленая, 38,
Тел.: +7-8452-27-24-01; E-mail: ryskin_sb@cplire.ru

кандидат физико-математических наук
(специальность 01.04.03–Радиофизика),
старший научный сотрудник, Саратовский
филиал ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова
РАН

Рожнев Андрей Георгиевич

Адрес: 410038, г. Саратов, ул. Зеленая, 38,
Тел.: +7-8452-27-24-01; E-mail: RozhnevAG@info.sgu.ru

Личные подписи Никиты Михайловича Рыскина и Андрея Георгиевича Рожнева заверяю

Зам. директора по науке СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
Фатеев Денис Васильевич

17.09.2025 г.

