

ОТЗЫВ

официального оппонента
о диссертационной работе Гаштури Антона Петровича
«Анализ и синтез квазиоптических преобразователей
гироприборов методами интегральных уравнений»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – радиоп физика

Диссертационная работа А.П. Гаштури посвящена исследованию волновых процессов в квазиоптических системах гиротронов, а также развитию методов проектирования волноводных преобразователей, используемых в гироприборах, на основе решения интегральных уравнений для электрического тока, вытекающих из граничных условий для поля на проводящих поверхностях данных устройств. Указанные системы обладают сложной геометрией и характеризуются высокой сверхразмерностью. В этих условиях определенные преимущества (прежде всего, в скорости получения численного решения) по сравнению с хорошо известными подходами, опирающимися на метод конечных элементов в частотной области или конечно-разностный метод во временной области, имеет обсуждаемый в диссертации метод граничных элементов, основанный на непосредственном использовании граничных условий для поля на поверхностях проводников. В диссертации на основе применения данного подхода к анализу полей строится процедура синтеза поверхностей высокоэффективных волноводных излучателей, в том числе многочастотных. Развитие методов анализа и синтеза таких квазиоптических систем, а также поиск путей уменьшения дифракционных потерь в них применительно к современным гиротронам, мощность излучения которых достигает мегаваттного уровня при длительности импульса сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения до сотен секунд, являются, безусловно, насущными задачами. Отмеченные обстоятельства делают тему диссертации весьма актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков публикаций автора по теме диссертации и цитированной литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, а также основные положения, выносимые на защиту, описан вклад автора в получение представленных в диссертации результатов, отмечены их новизна и практическая значимость, кратко изложено содержание работы.

Первая глава посвящена методам анализа электромагнитных полей в сверхразмерных квазиоптических системах, таких как открытые волноводы и зеркальные линии передачи. Основное внимание уделяется подходу, опирающемуся на использование интегрального уравнения электрического поля и метода физической оптики, которые позволяют анализировать волновые процессы в рассматриваемых электродинамических системах с высокой точностью представления электромагнитных полей. Показано, что использование метода моментов и алгоритма многоуровневого мультипольного разложения при решении интегрального уравнения электрического поля существенно снижает требования к необходимым вычислительным ресурсам и повышает производительность расчетов. Установлено, что применяемый в диссертации гибридный метод, который объединяет преимущества обоих указанных подходов, позволяет проводить

эффективный анализ сложных квазиоптических преобразователей, используемых в мощных гиротронах.

Во второй главе рассматривается синтез волноводных преобразователей, основанный на сочетании его процедуры с решением интегрального уравнения электрического поля. Подробно рассмотрена процедура синтеза волноводных излучателей, в которой каждый этап предполагает решение двух задач распространения электромагнитного излучения – прямой и обратной. Предложенная методика была применена для синтеза уникального преобразователя с волноводным излучателем, изменяющим угловой спектр рабочего излучения гиротрона на частоте 28 ГГц. Показано, что преобразователь эффективно трансформирует рабочую моду гиротрона в гауссово-подобный пучок, имея при этом значительно меньшую длину по сравнению с излучателями, слабо меняющими угловые характеристики рабочей моды. Синтезированный излучатель был изготовлен двумя методами: фрезерованием алюминиевой заготовки с последующим наращиванием меди и вытравливанием алюминия и путем трехмерной полимерной печати с последующим наращиванием меди и вытравливанием печатного материала. Экспериментальное тестирование данных опытных образцов при постоянной мощности 20 кВт продемонстрировало высокую эффективность (более 97%) преобразования моды гиротрона $TE_{1,2}$ в гауссово-подобный пучок, согласующуюся с расчетным значением.

Третья глава посвящена разработке многочастотных волноводных излучателей и двунаправленных квазиоптических преобразователей для гиротронов. Здесь решается задача расширения числа преобразуемых рабочих мод гиротрона на основе их разделения на две группы согласно направлению вращения полей и использования двух окон разной толщины для каждой из групп. Показано, что такой подход позволяет достичь высоких коэффициентов преобразования мод (до 98%) при низких уровнях дифракционных потерь. Для многочастотного гиротрона в диапазоне 175–250 ГГц продемонстрирована перспективность практической реализации предложенного волноводного излучателя.

В четвертой главе исследуется возможность оптимизации процедуры синтеза волноводных излучателей с применением метода итерационной физической оптики. Новизна предложенного здесь подхода состоит в замене сверхразмерного волновода с относительно плавной неглубокой деформацией стенки, слабо меняющей ширину углового спектра рабочей моды, волноводом с невозмущенной стенкой при введении специально подобранного фазового множителя, позволяющего учесть ее нерегулярность, имеющуюся в реальной системе. Показано, что такая замена позволяет упростить синтез волноводных излучателей и существенно повысить его скорость за счет появляющейся при этом возможности итерационного решения системы скалярных интегральных уравнений для компонент тока на проводящих поверхностях в случае достаточно узкого углового спектра излучения. Точность и вычислительная эффективность предложенного метода подтверждены сравнением полученных на его основе результатов с данными расчетов, использующих решение строгого интегрального уравнения электрического поля.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она представляет собой законченную работу, в которой получены новые научные результаты, важные как в теоретическом отношении, так и в практическом плане. Существенным достоинством работы является то, что постановка рассмотренных в ней теоретических задач отвечает условиям работы конкретных волноводных систем,

применяемых в электронных СВЧ приборах. Это позволяет использовать результаты диссертации для разработки новых электродинамических систем СВЧ диапазона.

Все результаты диссертации имеют четкое обоснование и ясную физическую интерпретацию. Тщательность проведения теоретического анализа и численного моделирования, согласие сделанных на их основе заключений с результатами расчетов, выполненных другими методами, а также с экспериментальными данными позволяют считать научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованными и достоверными.

Личный вклад автора в получение результатов диссертации состоит в участии в постановке рассмотренных задач, их решении, проведении численных расчетов с помощью разработанных для этого оригинальных методов и компьютерных программ, а также анализе полученных данных и не вызывает сомнений.

Диссертация написана ясным, четким языком, достаточно хорошо оформлена, содержит большое число иллюстраций, делающих изложение полученных результатов весьма наглядным.

Работа не свободна, однако, от некоторых недостатков:

1. В главе 4 при обсуждении возможности замены нерегулярной поверхности сверхразмерного волновода фазовым корректором и переходе к системе скалярных интегральных уравнений для компонент тока на стенке волновода приведены условия применимости такого подхода, которые не содержат ни длину нерегулярного участка, ни соотношение между пространственным масштабом нерегулярности стенки волновода и длиной волны. В связи с этим возникает вопрос о том, являются ли сформулированные в диссертации условия применимости предложенного подхода достаточными.
2. Интегральные уравнения (4.12) содержат слагаемые с оператором градиента, что делает их векторными, хотя данные слагаемые должны быть скалярными. Неясно, каким образом вычисляются эти слагаемые, поскольку в них дифференцирование по радиальной цилиндрической координате применяется к введенной на с. 82 функции Грина, не зависящей от данной координаты. Аналогичное замечание можно отнести и к уравнениям (4.16). Кроме того, в (4.12) не расшифровано обозначение $L(\varphi)$.
3. Формулировку выносимого на защиту положения 3 на с. 10 диссертации вряд ли можно считать удачной. В этом положении не конкретизированы величины, для которых могут быть введены скалярные интегральные уравнения, а также не поясняется, профиль какой электродинамической системы заменяется фазовым корректором. Поэтому понять содержание данного положения можно, лишь ознакомившись полностью с главой 4 диссертации.
4. В тексте работы имеются погрешности изложения и опечатки:
 - а) В названии главы 3 уместнее было бы говорить о синтезе не широкополосных, а многочастотных волноводных излучателей, поскольку в ней рассматриваются лишь дискретные значения частот.
 - б) В выражении для нормальной компоненты электрического поля на с. 48 отсутствует мнимая единица.
 - в) В уравнениях (4.16) пределы интегралов записаны с ошибками.
 - г) Во многих местах диссертации после формул, вынесенных в отдельные строки, отсутствуют необходимые знаки препинания, а продолжающийся далее текст содержит ненужные абзацные отступы.

Отмеченные недостатки не могут влиять на общую положительную оценку данной диссертации, ее научной и практической значимости.

Основные результаты диссертации А.П. Гаштури опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и 20 работах в сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских научных конференций. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что диссертация А.П. Гаштури «Анализ и синтез квазиоптических преобразователей giroприборов методами интегральных уравнений» является завершенной работой, содержащей решение научной задачи, имеющей важное значение для развития методов анализа и синтеза волноводных устройств СВЧ диапазона, и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024 г.), которые предъявляются к кандидатским диссертациям, а ее автор Гаштури Антон Петрович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Выражаю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность 1.3.4 – радиофизика), профессор, заведующий кафедрой электродинамики радиотехнического факультета Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского



Кудрин Александр Владимирович
5 сентября 2025г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского».
Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.
Тел.: (831) 4623262, электронный адрес: kud@rf.unn.ru

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ

Зам. начальника управления кадров
НИГУ им. Н.И. Лобачевского

Т.А. СУББОТИНА

