

На правах рукописи



ГАШТУРИ Антон Петрович

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ГИРОПРИБОРОВ
МЕТОДАМИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

1.3.4 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Научный руководитель:

Григорий Геннадьевич Денисов,
доктор физико-математических наук,
академик РАН, директор ИПФ РАН

Официальные оппоненты:

Александр Владимирович Кудрин,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой электро-
динамики Радиофизического факультета
ННГУ им. Н.И. Лобачевского
Андрей Игоревич Клеев;
доктор физико-математических наук,
директор Института физических
проблем им. П.Л. Капицы РАН

Ведущая организация:

ФГБУН Институт радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова
РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится «6» октября 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН и на сайте www.ipfran.ru.

Автореферат разослан «28» августа 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Для широкого спектра приложений, от фундаментальных (УТС, ускорение частиц и т.д.) до прикладных (медицина, радиолокация и др.), применение вакуумных генераторов излучения сверхвысокой частоты (СВЧ) играет ключевую роль [1]. Самый мощный из подобных приборов – гиротрон – способен генерировать более 1 МВт непрерывной (длительность импульса более 100 секунд) мощности. Одним из важнейших аспектов, влияющих на эффективность генератора столь высокой мощности, является минимизация дифракционных потерь в элементах системы вывода генерируемого излучения. К подобным системам относятся волноводные и зеркальные линии высокой сверхразмерности. Размеры отдельных элементов системы транспортировки СВЧ мощности могут достигать сотен длин волн, а линейные размеры всей системы – тысяч длин волн. Зачастую элементы систем должны иметь специфически заданный профиль поверхности, позволяющий формировать заданное распределение поля на поверхности и уменьшающий тем самым дифракционные потери. Такая деформация поверхности является результатом многочисленных расчетов электромагнитных полей в системе, и скорость, как и точность вычислений, играет заметную роль в проектировании систем вывода излучения мощных генераторов СВЧ энергии.

В настоящее время мощность вычислений на персональных компьютерах достигла такого уровня, который позволяет производить полный анализ электромагнитного поля в трехмерных электродинамических системах за разумное время, и скорость подобных вычислений неуклонно растет. В этой связи постепенный уход от аналитических и полуаналитических методов анализа волновых процессов к их численному моделированию – это современный подход исследования подобных систем.

Одними из самых популярных методов являются метод конечных элементов в частотной области электродинамики (FEM – *finite element method* [2]) и конечно–разностный метод во временной области (FDTD – *finite difference time domain* [3]). Оба этих метода имеют дело с дискретизацией расчетной области пространства, имея таким образом асимптотику $O(L^3)$ для затрат машинных ресурсов (оперативной памяти и числа операций вычисления), где L – линейный размер системы. Объем расчетной области может быть снижен для внутренних задач распространения волн в волноводах и ограничивается его стенками, но для внешних задач (задач рассеяния излучения на проводящих объектах) или для задач излучения в открытое пространство в открытых волноводах эти методы имеют заметные ограничения на объем расчётной области пространства.

В расчетах открытых линий методы граничных элементов (BEM – *boundary elements method*) [4, 5], основанные на граничных условиях на границе проводника, оказываются намного эффективнее, чем FEM и FDTD. Та-

кие методы оперируют только с границей проводника, а решение представляется в виде поверхностного электрического тока, распределение которого на данной поверхности находится из решения интегрального уравнения, соответствующего граничному условию на поверхности металла. Соответственно затраты вычислительных ресурсов оказываются снижены, а область пространства исследования полей формально не ограничена.

В данной работе методы граничных элементов адаптированы для анализа волновых процессов в различных электродинамических системах, которые часто встречаются в генераторах и усилителях СВЧ, а так же линиях передач. Представлены несколько вариаций метода граничных элементов для решения задач рассеяния в открытых линиях передач СВЧ и внутренних задач распространения волн в волноводах и преобразования мод в волноводных преобразователях. На основе предложенных методов строятся методы синтеза поверхности волноведущих элементов, осуществляющих требуемое преобразование электромагнитного излучения.

Цели и задачи исследования

1. Развитие и адаптация методов граничных элементов для анализа волновых процессов в мощных генераторах СВЧ излучения, а так же построение процедур эффективного синтеза открытых волноводных преобразователей на базе данных методов.

2. Разработка уникального гиротронного преобразователя с излучателем, меняющим угловой спектр излучения, и как следствие имеющего уменьшенные размеры по сравнению с классическими вариантами реализации подобной системы.

3. Демонстрация возможности увеличения числа мод, на которых может работать мощный гиротрон с минимальными дифракционными потерями и уровнем отражения от выходного окна, за счет применения двунаправленного квазиоптического преобразователя и пары однодисковых окон.

4. Реализация компьютерного кода для проектирования квазиоптических систем на основе быстрых трехмерных методов, предназначенного к использованию широким кругом лиц.

Объект исследования

Объектом настоящего исследования являются волновые процессы в сверхразмерных электродинамических системах, таких как волноводные преобразователи волноводных мод, квазиоптические (КО) преобразователи гиросприборов и т. д., а также методы проектирования таких систем с требуемыми характеристиками трансформации СВЧ излучения.

Научная новизна исследования

Методы расчета гиротронных преобразователей можно условно разделить на аналитические подходы и методы численного моделирования. Анали-

тические подходы сводятся к расчету гофрировки волноводного излучателя как волноводного преобразователя входной волноводной моды в смесь из 9 парциальных мод, дающих распределение поля на выходной зоне Бриллюэна близкое к гауссовому [6]. Такой подход обладает рядом преимуществ: быстрота получения решения, аналитичность поверхности и невысокая глубина гофрировки, а следовательно, и простота в изготовлении и юстировке системы. Среди численных подходов себя зарекомендовал метод синтеза с помощью решения скалярного интегрального уравнения на основе интеграла Кирхгофа [7]. Распространение волноводной моды достаточно точно описывается таким интегралом для сверхразмерного волновода. Метод является быстрым и позволяет синтезировать излучатели с меньшей длиной, чем это позволяет сделать аналитический подход, но глубина профиля получается на порядки больше. Однако формулировка метода ограничивается профилем волновода, не сильно меняющим угловые характеристики исходной моды. Для адекватного проектирования излучателей с более сложным модовым составом хорошо подходят методы векторных интегральных уравнений [4]. Они следуют напрямую из уравнений Максвелла и описывают распространение волн в системах с произвольной геометрией, в том числе в открытых волноводах и линиях передач. Получение решения таких уравнений происходит за время, заметно превышающее подходы, описанные выше, но результат является достоверным для систем как малой, так и высокой сверхразмерности, а в самом решении содержится полная информация о трехмерных полях в системе. Для подхода, позволяющего синтезировать волноводные излучатели без ограничений на характер гофрировки, предложена связка решения уравнения EFIE с процедурой синтеза, предложенной в ИПФ РАН [8]. Процедура синтеза оперирует с компонентами электромагнитного поля на поверхности устройства, которые напрямую связаны с распределениями электрического тока, являющимися решениями интегральных уравнений.

Данным методом спроектирован уникальный короткий КО преобразователь, имеющий в своем составе излучатель на моде $TE_{-1,2}$ с малым углом Бриллюэна и преобразующим эту моду в гауссово-подобный электромагнитный пучок с большим углом Бриллюэна. За счет такого преобразования размер квазиоптической системы значительно уменьшен. Излучатель изготовлен в двух экземплярах двумя методами производства: наращивания меди на выточенную заготовку из алюминия и инновационный метод печати полимерной заготовки на 3d принтере и последующей металлизацией поверхности заготовки. Коэффициент преобразования данного преобразователя составляет более 98%, что подтверждено в ходе эксперимента для обоих образцов излучателя.

Для первого приближения для профиля излучателя, в ситуациях когда угловой спектр исходной моды сильно не изменяется в преобразователе, в качестве метода синтеза предложен гибридный метод данной процедуры синтеза с методом на основе уравнения итерационной физической оптики [9], но опе-

рирующим с неизменной на всех итерациях синтеза поверхностью регулярно волновода, а синтезируемый профиль включен в расчет как фазовый корректор для тока. Опираясь с геометрией невозмущенного волновода в полярных координатах, интегральное уравнение итерационной физической оптики можно привести к системе скалярных интегральных уравнений для двух компонент поверхностного тока – азимутальной и продольной. Интегралы в полученных уравнениях являются свертками и могут быть посчитаны с помощью быстрого преобразования Фурье [10]. Данный подход позволяет ускорить процедуру синтеза излучателей гиротрона многократно и позволяет получить хорошее приближение для синтезируемой поверхности системы с размерами порядка сотен длин волн за несколько минут.

Практическая значимость

Результаты диссертационной работы были использованы для синтеза квазиоптических систем гиротронов в широком частотном диапазоне – от 28 до 530 ГГц. Как уже отмечалось, мощные гиротроны широко используются для самых разных приложений, включая нагрев плазмы в установках УТС, спектроскопию высокого разрешения, микроволновые технологии. Описанный в диссертации излучатель, меняющий угловой спектр мод, используется в комплексе для выращивания алмазных пленок и дисков методом химического осаждения из газовой фазы (*chemical vapor deposition – CVD*).

Разработанный вычислительный код интегрирован в пакет ANGEL [28A], в качестве модуля позволяющего синтезировать профиль преобразователя рабочей моды гиротрона в узконаправленный волновой пучок, а так же производить трехмерный расчет полей в квазиоптической системе вывода гиротрона. Данный программный пакет широко используется разработчиками гиротронов в ИПФ РАН и ЗАО НПП ГИКОМ, что подтверждается справкой о практическом использовании результатов.

Апробация и публикация результатов исследования

По теме диссертационной работы опубликовано 9 статей в ведущих российских и международных журналах, а также 20 докладов в трудах российских и международных конференций.

Результаты работы обсуждались на научных семинарах ИПФ РАН, а так же на международных и российских конференциях: «Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics» (Кардифф, Великобритания, 2–9 сентября 2007 г.), «Conf. Digest of the Joint 34nd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves» (Бусан, Корея, 21–25 сентября, 2009 г.), «17th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating» (Дёрне, Голландия, 7–10 мая, 2012 г.), «24–nd Joint Russian–German Meeting on ECRH and Gyrotrons» (Нижний Новгород, Россия, 11–15 июня, 2012 г.), «38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves» (1–6 сентября, 2013 г.), «44th

International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves» (1–6 сентября, 2019 г.), «46th International Conference on Infrared and Millimeter Waves» (Чэнду, Китай, 29 августа – 3 сентября, 2021 г.), «2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)» (Чэнду, Китай, 21–25 апреля, 2024 г.), «XII Нижегородская сессия молодых ученых» (Татинец, Нижегородская область, Россия, 2007 г.), «XIII Нижегородская сессия молодых ученых» (Татинец, Нижегородская область, Россия, 20–25 апреля 2008 г.), «X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн» (Нижний Новгород, Россия, 29 февраля – 3 марта 2016 г.), «XII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн» (Нижний Новгород, Россия, 28 февраля – 4 марта 2022 г.), XI Всероссийская научно–техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт–Петербург, Россия, 30 мая – 3 июня 2022 г.), XII Всероссийская научно–техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт–Петербург, Россия, 29 мая – 2 июня 2023 г.), XX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», (Сочи, Россия, 18–22 сентября 2023 г.).

Личный вклад автора

Основу диссертационной работы составляют публикации [1А–29А]. Во всех этих работах используются расчеты, произведенные лично автором с помощью кода, реализованного самим автором. В работах [4А, 6А, 7А, 9А, 26А, 27А, 29А] вклад автора является определяющим.

Идея реализации волноводного излучателя для волны с малым углом Бриллюэна путем трансформации исходной моды $TE_{-1,2}$ в гауссово–подобное распределение с угловым спектром близким к волноводной моде с большим углом Бриллюэна предложена автором. Выбор подходящей для такого целевого преобразования моды $TE_{9,2}$ происходил при участии соавтора [7А] Д.И. Соболева и научного руководителя Г.Г. Денисова.

Идея способа расчета распределения тока на поверхности слабонерегулярного волновода методом итерационной физической оптики для регулярно волновода, в котором нерегулярность поверхности учитывается соответствующей фазовой коррекцией на каждой итерации, предложена автором. Данный подход позволяет реализовать процедуру синтеза сверхразмерных волноводных излучателей со значительно превосходящей скоростью по сравнению с аналогичной процедурой, включающей в себя решение уравнения ЕФЕ.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод интегрального уравнения электрического поля может быть включен в процедуру оригинального итерационного метода синтеза волноводных структур, предложенного в ИПФ РАН [8], благодаря однозначному соответствию поверхностного тока и компонент электромагнитного поля на

стенке волновода. Сочетание метода синтеза и интегрального уравнения позволяет проектировать сверхразмерные открытые волноводные излучатели, в частности в составе систем вывода излучения мощных гиротронов.

2. Квазиоптический преобразователь с входной квазипараксиальной волноводной модой (поперечное волновое число много меньше продольного) может быть значительно уменьшен в размерах за счет преобразования внутри его излучателя исходной моды в гауссово-подобное излучение, распространяющееся под большим углом к оси волновода.

3. Для достижения первого приближения для синтезируемой поверхности излучателя, в случае, когда угловой спектр излучения узок, в итерационном методе синтеза вместо решения интегрального уравнения электрического поля можно решать упрощенное интегральное уравнение. Путем замены реального профиля на фазовый корректор можно описать систему волноводного излучателя в полярной системе координат, а векторное интегральное уравнение физической оптики привести к системе из двух скалярных интегральных уравнений, интегралы в которых имеют вид сверток и могут быть посчитаны с помощью быстрого преобразования Фурье, что ускоряет процедуру синтеза радикально (в сотни раз).

4. Для увеличения количества рабочих мод гиротрона и их эффективно вывода из прибора может быть использован двунаправленный квазиоптический преобразователь и пара однодисковых окон. Моды разделяются по направлению вращения, а отличающиеся частоты каждого направления должны быть согласованы с частотами пропускания соответствующего окна.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 97 страниц, включая 33 изображения, 4 таблицы, список публикаций автора по теме диссертации из 29 наименований и список цитируемой литературы из 36 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1 посвящена методам анализа электромагнитных полей в сверхразмерных квазиоптических системах, состоящих из отрезков открытых волноводов и зеркальных линий передач СВЧ мощности, на основе интегрального уравнения электрического поля (EFIE, [1А–3А, 4, 5]) и принципа физической оптики [4]. Рассматриваются гармонические $e^{-i\omega t}$ процессы, где ω – циклическая частота излучения. Интегральное уравнение электрического поля представляет собой запись граничного условия на поверхности проводника $\vec{E}_t = 0$, записанного в виде интеграла от электрического тока на данной поверхности, индуцированного известным падающим излучением:

$$\hat{t} \cdot \vec{E}^{ext}(\vec{r}) = \frac{k}{ic} \hat{t} \cdot \int_S \left(1 - \frac{\nabla \nabla'}{k^2}\right) G(\vec{r}, \vec{r}') \vec{j}_S(r') dS', \quad (1)$$

где $G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$ – функция Грина для уравнения Гельмгольца, \vec{j}_S – комплексная амплитуда электрического тока на поверхности проводника, соответственно, \vec{E}^{ext} – электрическое поле, создаваемые заданными сторонними источниками, $k = \omega/c$ – волновое число, а c – скорость света в вакууме. Для волноводной моды круглого волновода сторонние источники можно задавать как соответствующие интегралы от элементарных магнитного и электрического токов \vec{m}_A и \vec{j}_A на входном сечении волновода A (рис. 1), которые связаны с полями \vec{E}_{in} и \vec{H}_{in} входной моды:

$$\vec{j}_A = \frac{c}{4\pi} [\vec{n}_A, \vec{H}_{in}], \quad (2)$$

$$\vec{m}_A = -\frac{c}{4\pi} [\vec{n}_A, \vec{E}_{in}]. \quad (3)$$

Для решения уравнения (1) применяется метод Галеркина (метод моментов [4]), который сводит интегральное уравнение к системе линейных интегральных уравнений (СЛАУ), которое решается итерационно. Уравнение (1) является интегральным уравнением Фредгольма первого рода (искомая функция тока находится только в подынтегральном выражении) и его решение потенциально неустойчиво. Тем не менее, для открытых волноводов требуемое число итераций поиска решения редко превышает нескольких сотен для достижения относительной погрешности 10^{-3} .

Алгоритм, позволяющий заметно ускорить решение полученной СЛАУ соответствующего уравнению EFIE, это MLFMA (*Multilevel fast multipole algorithm* [4, 5]). Его применение позволяет снизить количество операций, требуемых для произведения матрицы СЛАУ на вектор в пространстве решений, с $O(N^2)$ до $O(M \log N)$. Такой подход позволяет рассчитывать волноводные излучатели квазиоптической системы гиротрона с характерным размером в сотни длин волн за десятки минут на персональном компьютере (например, используемый в расчетах ЭВМ имеет ЦП Intel i5 10400 и 32 Гб ОЗУ).

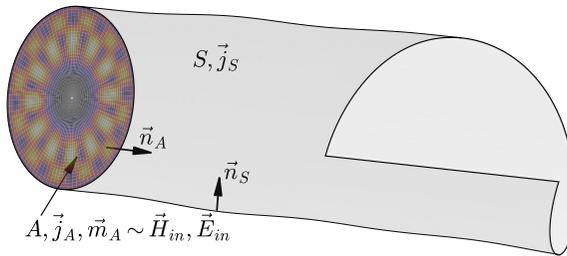


Рис. 1. Схематичное изображение постановки задачи рассеяния для моделирования излучателя гиротрона уравнением EFIE

Приближение физической оптики (ФО или РО – *physical optics* [4]) позволяет рассчитывать электромагнитные поля в зеркальной части квазиоптических систем гироприборов. В отличие от интегрального уравнения электрического поля, в приближении ФО распределение электрического тока на по-

верхности элемента системы выражается напрямую через магнитное поле падающего на поверхность излучения:

$$\vec{j}_s(\vec{r}) = \frac{c}{2\pi} [\vec{n}_s(\vec{r}), \vec{H}^{ext}(\vec{r})]. \quad (4)$$

Такое приближение дает высокую точность решения для зеркал, имеющих гладкую и плавную деформацию (радиус кривизны поверхности много больше длины волны), а также размеры которых превышают апертуру падающего излучения. В зеркальных линиях квазиоптических преобразователей мощных гиротронов, как правило, эти условия соблюдены и пересчет поля в системе из нескольких зеркал может быть произведен посредством последовательных пересчетов магнитного поля между следующими друг за другом зеркалами. Число таких пересчетов равно числу зеркал в системе и такой расчет зеркальной линии производится в десятки раз быстрее чем решение интегрального уравнения электрического поля для подобной системы. Для пересчета также используется метод моментов и MLFMA.

Для всей квазиоптической системы гиротрона, состоящей из волноводно-го излучателя и серии зеркал, можно использовать гибридный EFIE/ПО метод [4А, 5А]. Распределение тока на поверхности излучателя рассчитывается путём решения EFIE, а поле, создаваемое этим распределением тока, используется как источник для пересчета в зеркальной части системы по принципу физической оптики. На рис. 2 изображено распределение поля в квазиоптическом преобразователе 140 ГГц гиротрона на моде TE_{22,8}. Размер системы составляет примерно 300 длин волн, а расчет требует около 30 минут и 4 Гб ОЗУ. Для проверки результата расчета, данный КО преобразователь был посчитан единым уравнением EFIE для всей системы, что потребовало около 3 часов времени и 10 Гб ОЗУ. Результаты расчетов обоими подходами (решение единого EFIE для всей системы и гибридный EFIE/ПО метод) имеют совпадение более 99% по интенсивности поля на выходном окне гиротрона.

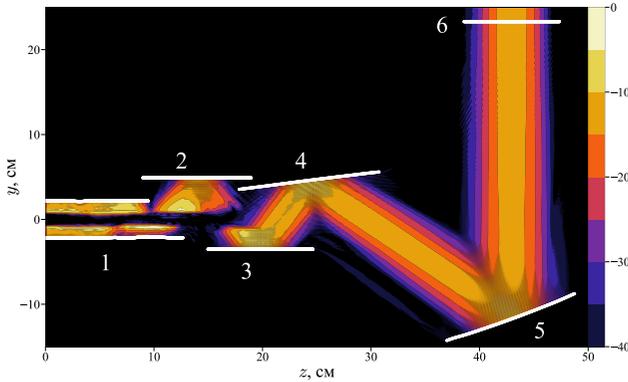


Рис. 2. Распределение поля $20 \cdot \log_{10}(|E_x|/|E_{x,max}|)$ (шкала в дБ) в пространстве квазиоптического преобразователя 140 ГГц гиротрона, рассчитанное комбинированным EFIE/ПО методом (1 – излучатель, 2 – повторитель, 3 – квазипараболическое зеркало, 4, 5 – поворотные зеркала, 6 – окно)

В главе 2 описанные методы анализа внедряются в процедуру синтеза волноводных преобразователей, разработанную в ИПФ РАН [8]. Данная процедура на каждой своей итерации оперирует решениями двух задач распространения электромагнитного излучения в волноводе. Первая задача – распространение исходной моды от входного сечения преобразователя A_1 к выходному A_2 и вторая – распространение обращенного целевого распределения от выходного сечения к входному (рис. 3). Обозначив, соответственно, эти решения как $\{\vec{E}^+, \vec{H}^+\}$ и $\{\vec{E}^-, \vec{H}^-\}$, можно определить параметр связи P для этих распределений и функцию F на боковой поверхности S преобразователя, которые и определяют поправку l для профиля синтезируемой поверхности [8]:

$$P = \int_{A_2} ([\vec{E}^+, \vec{H}^-] - [\vec{E}^-, \vec{H}^+]) \vec{n} dS, \quad (5)$$

$$F = -ik(\vec{H}_\tau^+ \vec{H}_\tau^- + \vec{E}_n^+ \vec{E}_n^-), \quad (6)$$

$$l = \alpha(P, F) \cdot \text{Re}F + \beta(P, F) \cdot \text{Im}F. \quad (7)$$

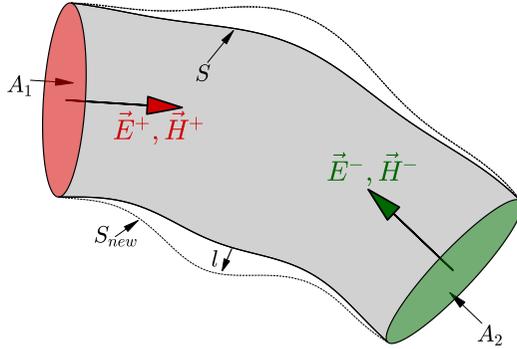


Рис. 3. Схема процедуры синтеза

Принцип синтеза может оперировать любым подходящим методом расчета полей в синтезируемой системе. Использование уравнения EFIE оказывается удобным для синтеза волноводных излучателей гиротрона. Интегральное уравнение является полностью трехмерным методом и позволяет задавать источники излучений для требуемых в процедуре синтеза распространений и как волноводные порты (для задачи прямого распространения) так и распределения на более сложных поверхностях (например, на области цилиндрического продолжения излучателя, соответствующей выходной зоне Бриллюэна [6] или даже на поверхности следующего за излучателем квазипараболического зеркала). К тому же, поверхностные распределения полей, требуемые для вычисления (6) однозначно выражаются через электрический поверхностный ток, что приводит к простому прямому расчету F через токи – решения EFIE:

$$F = -ik \cdot \left(\frac{4\pi}{c}\right)^2 \cdot (\vec{J}^+ \vec{J}^- + \frac{\nabla \vec{J}^+ \nabla \vec{J}^-}{k^2}). \quad (8)$$

Раздел 2.3 описывает все аспекты разработки компактного волноводного излучателя в составе квазиоптического преобразователя 28 ГГц гиротрона на рабочей моде $TE_{-1,2}$ [7A], который был успешно синтезирован процедурой на основе уравнения ЭФЕ. При диаметре волновода 66 мм мода $TE_{-1,2}$ имеет продольное волновое число значительно большее, чем поперечное. Отношение этих волновых чисел определяет угол Бриллюэна [6], который в данном случае составляет всего 16° . Это приводит к тому, что размер излучателя (в первую очередь, длина) может достигать 1500...2000 мм, если его проектировать традиционным способом – добиваясь группировки поля в центре зоны Бриллюэна, соответствующей той же моде, посредством плавной деформации волновода. Можно добиться группировки поля в окрестности зоны Бриллюэна, соответствующей другой моде, но необходимо также преобразовать и угловые характеристики излучения. На рис. 4 представлены размеры зон Бриллюэна на развертке боковой поверхности волновода, соответствующие модам $TE_{-1,2}$ и $TE_{9,2}$. $TE_{9,2}$ – мода, угловые характеристики которой были выбраны как целевые для требуемого преобразования.

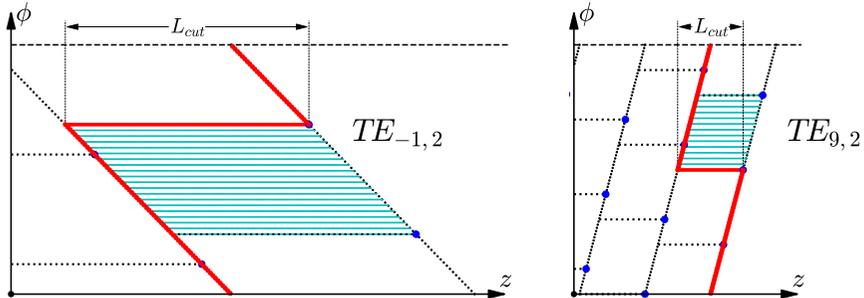


Рис. 4. Сравнительные масштабные изображения зон Бриллюэна («заштрихованные» области) и винтовых срезов излучателей («жирные» линии) для мод $TE_{-1,2}$ и $TE_{9,2}$ на боковой развертке поверхности круглого волновода с радиусом 33 мм на частоте 28,12 ГГц

Проектирование излучателя состояло из двух этапов. Сначала был синтезирован волноводный преобразователь $TE_{-1,2} \rightarrow TE_{9,2}$ с эффективностью преобразования 95% и длиной 450 мм. К данной секции круглого волновода добавили винтовой срез, соответствующий моде $TE_{9,2}$, и, используя полученный профиль как стартовый, запустили синтез всей поверхности излучателя, трансформирующей входную моду $TE_{-1,2}$ в гауссовоподобный пучок с угловыми характеристиками близкими к моде $TE_{9,2}$. Результатом синтеза стал профиль с эффективностью преобразования 98,3%. На рис. 5 изображены стартовый и финальный профиль процедуры синтеза, а так же распределение тока на развертке излучателя. Длина излучателя составила всего 590 мм, а общий размер КО системы (с квазипараболическим и поворотным зеркалами) не превысил 800 мм.

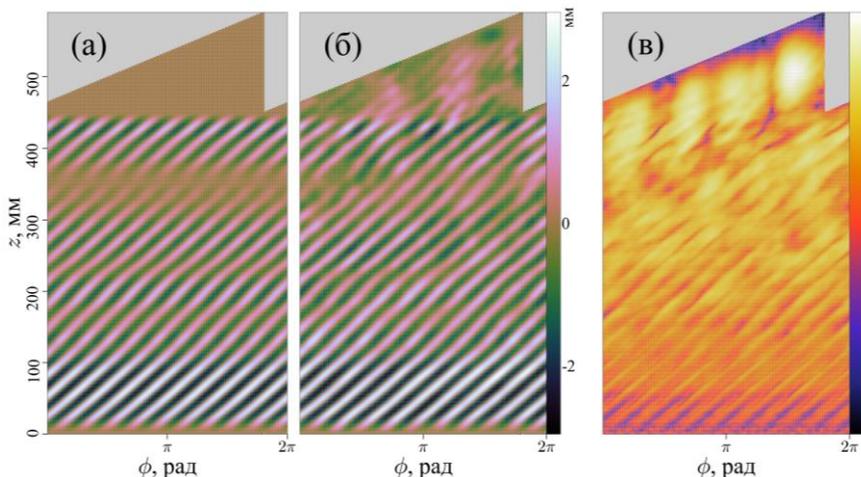


Рис. 5. Стартовый приближенный и финальный профили преобразователя (а и б соответственно), распределение поверхностного тока на его поверхности (в)

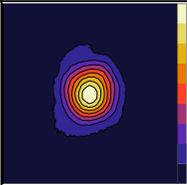
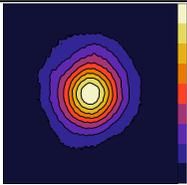
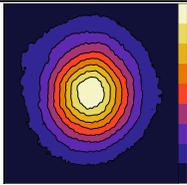
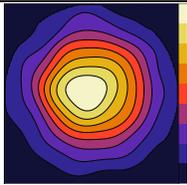
Излучатель был изготовлен двумя методами производства: фрезерование заготовки из алюминия, с последующим наращиванием меди и вытравливанием алюминия и трехмерной печати полимерной заготовки с последующим наращиванием меди и вытравливанием печатного материала (рис. 6). Экспериментальное исследование гиротрона с постоянной мощностью 20 кВт показало высокую эффективность обоих образцов на уровне 97,8%. Суммарный уровень потерь не превысил 5%.



Рис. 6. Два образца синтезированного излучателя для 28 ГГц гиротрона, изготовленные путем трехмерной полимерной печати (верхний образец) и ЧПУ фрезерования (нижний)

В таблице 1 приведены распределения излучаемой мощности, измеренные в трех сечениях на расстояниях l от выхода квазиоптического преобразователя гиротрона и интенсивность во входном сечении волноводной линии передачи, восстановленная по данным измерения методом, изложенным в [11].

Таблица 1. Экспериментальное исследование КО преобразователя 28 ГГц гиротрона

Наблюдаемые распределения поля на дистанции l от выхода КО преобразователя (апертура 360*360 мм)				Реконструированное поле (89*89 мм)
l	380 мм	580 мм	780 мм	
Амплитуда поля				
$\eta_{HE_{11}}$	96,5%	96,3%	97,6%	97,8%

Глава 3 посвящена многочастотному варианту процедуры синтеза с интегральными уравнениями [6А, 8А]. Каждая итерация синтеза в данном случае включает в себя расчет полей на всех частотах (и соответствующих модах), а поправка для профиля синтезируемой поверхности вычисляется как суперпозиция функций, рассчитанных по соотношению (6) для всех частот (мод). Аналогично организован синтез широкополосных преобразователей, только число и соотношения между частотами определяются исходя из требуемой ширины рабочей полосы, а мода для всех частот в расчетах используется одна и та же.

Описанный подход применен для проектирования двунаправленного квазиоптического преобразователя для многочастотного 175–250 ГГц гиротрона [6А]. Преобразователи такого типа могут направлять излучение каждой из рабочих мод в один из двух зеркальных трактов в зависимости от того, какое вращение моды генерируется в резонаторе гиротрона – «правое» или «левое». Данный подход потенциально способен увеличить число рабочих мод гиротрона за счет использования двух отдельных выходных окон различной толщины. На рис. 7 продемонстрирована схема такого преобразователя. Исходя из возможности ступенчатой перестройки 250 ГГц гиротрона [12] и согласно полосам прозрачности двух окон с подобранными толщинами, для оптимизации были выбраны пять мод: $TE_{13,6}$ (175,7 ГГц), $TE_{-15,7}$ (206 ГГц), $TE_{18,7}$ (225,6 ГГц), $TE_{-16,8}$ (229,8 ГГц), $TE_{19,8}$ (249,5 ГГц).

Излучатель, обеспечивающий преобразование в гауссово-подобное распределение поля для всех выбранных мод, был синтезирован описанной выше многочастотной процедурой синтеза. На рис. 8 представлен финальный профиль и два распределения тока для двух мод встречного вращения. В таблице 2 приведены результаты расчетов с синтезированным КО преобразователем. Эффективности преобразования η_G в целевую гауссовую моду с учетом фазы составляют 96–98% в зависимости от моды, а дифракционные потери (ДП) не превышают 7%. Стоит отметить, что для двунаправленного КО преобразователя с излучателем без профиля дифракционные потери составляют

около 50%, а коэффициент трансформации в гауссов пучок не превышает 80%.

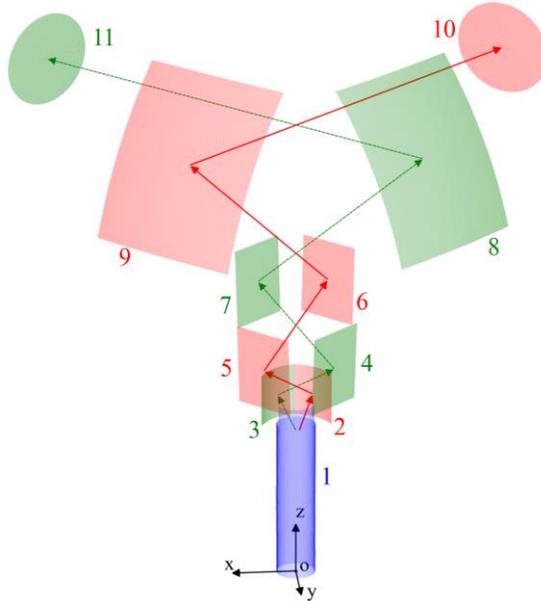


Рис. 7. Схема двунаправленного квазиоптического преобразователя с двумя выходными окнами (1 – излучатель, 2, 3 – пара квазиоптических зеркал, 2–9 – две серии поворотных зеркал, 10, 11 – выходные окна гиротрона)

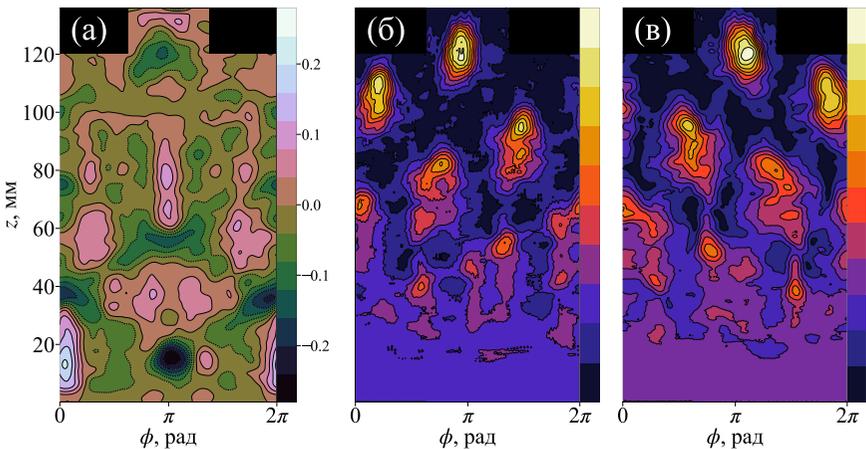
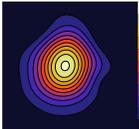
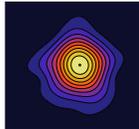
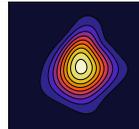
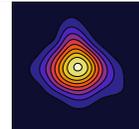


Рис. 8. Профиль излучателя многочастотного гиротрона (а) и распределения плотности поверхностного тока на развертке поверхности излучателя для мод $TE_{19,8}$ (б) и $TE_{-16,8}$ (в)

Таблица 2. Характеристики и распределения излучения на выходных окнах 175–250 ГГц гиротрона с двунаправленным КО преобразователем (апертура 35*35 мм)

Мода	TE _{13,6}	TE _{-15,7}	TE _{18,7}	TE _{-16,8}	TE _{19,8}
η_G	96,3%	98%	96%	97,6%	96,3%
ДП	7%	6%	4%	5%	5%
Амплитуда поля					

Основные результаты **главы 4** опубликованы в работе [9А], в которой представлена оптимизация процедуры проектирования сверхразмерных излучателей гиротрона путем поиска первого приближения для синтезируемой поверхности с помощью синтеза на основе уравнения итерационной физической оптики (ИФО, [9]). Это уравнение представляет собой итерационную запись поиска решения интегрального уравнения магнитного поля (MFIE, [4, 5]), но, в отличие от точного MFIE, оперирует незамкнутой поверхностью боковой стенки открытого волновода:

$$\vec{J}_S^n(\vec{r}) = \vec{J}_S^0(\vec{r}) + \frac{1}{2\pi} \left[\vec{n}_S(\vec{r}), \int_S [\vec{J}_S^{n-1}(\vec{r}'), \nabla' G(\vec{r}, \vec{r}')] ds' \right], \quad (9)$$

где $\vec{J}_S^0(\vec{r}) = \frac{c}{2\pi} [\vec{n}_S(\vec{r}), \vec{H}^{ext}(\vec{r})]$. Уравнение итерационной физической оптики не является строгим, но для сверхразмерных волноводов ($R_w k \gg 1$, где R_w – радиус волновода) применимо. В этих условиях последовательность \vec{J}_S^n достигает решения близкого к решению точного EFIE с погрешностью около 1% за число итераций n , примерно равным числу отражений излучения в волноводе (от единиц до нескольких десятков).

Если рассмотреть сверхразмерный волновод с плавной неглубокой деформацией стенки ($|\nabla(\Delta R)| \ll 1, \Delta R \ll R_w$, где $\Delta R(\vec{r})$ – значение глубины деформации), которая слабо меняет ширину углового спектра рабочей моды, то можно воспользоваться упрощенным уравнением ИФО. Оно оперирует невозмущенной поверхностью волновода круглого сечения, а реальный профиль учитывает, как фазовый множитель $\Psi(\vec{r})$ для подынтегрального выражения, который определяется выражением:

$$\Psi(\vec{r}) = 2k \cdot \Delta R(\vec{r}) \cdot \cos\gamma, \quad (10)$$

где γ – угол между падающим лучом и радиальным направлением в точке падения луча с координатой \vec{r} в лучевом представлении волноводной моды, который можно считать постоянным для всей поверхности [6]. В этом случае удобно перейти к полярным координатам (φ, z) и переписать уравнение (9) для компонент тока $\vec{J}_S(\varphi, z) = \hat{\varphi} \cdot J_\varphi(\varphi, z) + \hat{z} \cdot J_z(\varphi, z)$ в виде системы скалярных интегральных уравнений:

$$\begin{cases} J_{\varphi}^n(\varphi, z) = J_{\varphi}^0(\varphi, z) - \frac{R_w}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{L(\varphi)} J_{\varphi}^{n-1}(\varphi', z') e^{i\Psi(\varphi', z')} \nabla'_r G dz' d\varphi' \\ J_z^n(\varphi, z) = J_z^0(\varphi, z) + \frac{R_w}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{L(\varphi)} (J_z^{n-1}(\varphi', z') \nabla'_r G - \\ - J_{\varphi}^{n-1}(\varphi', z') \nabla'_z G \cdot \cos(\varphi - \varphi')) e^{i\Psi(\varphi', z')} dz' d\varphi'. \end{cases} \quad (11)$$

Ядра интегралов в системе (11) представляют собой производные функции Грина $G(|\vec{r} - \vec{r}'|)$, которые зависят только от разниц координат $(\varphi - \varphi', z - z')$, в силу того, что $|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{(z - z')^2 + 4 \cdot R_w^2 \cdot \sin^2((\varphi - \varphi')/2)}$. Таким образом, интегралы в этих уравнениях являются свертками и могут быть посчитаны с помощью быстрого преобразования Фурье [10].

Пример синтеза излучателя для моды $TE_{28,13}$ на частоте 184 ГГц показал прирост в скорости счета более чем в 500 раз (50 итераций быстрого синтеза с системой (11) потребовали около 3 минут времени, в то время как единственный проверочный расчет уравнения EFIE занял 30 минут). При этом нормированное произведение распределений поля, посчитанных с помощью системы (11) и точного решения уравнения EFIE составило более 99%. Так же, проверка уравнением EFIE подтвердила и высокую эффективность синтезированного с помощью системы (11) профиля, которая составила более 98%. На рис. 9 показан профиль, полученный быстрым синтезом, и распределения продольного магнитного поля на стенке преобразователя, посчитанные системой скалярных уравнений и уравнением EFIE.

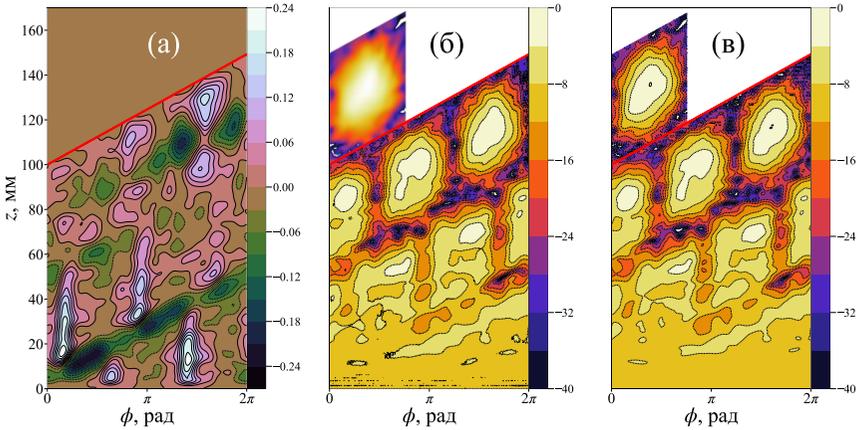


Рис. 9. Синтезированный профиль волноводного излучателя для моды $TE_{28,13}$ на частоте 184 ГГц (а) и соответствующие распределения продольного магнитного поля (шкала в децибелах) на стенке волновода и выходной зоне Бриллюэна, посчитанные методом уравнения EFIE (б) и системой скалярных уравнений (11) (в).

Таким образом, быстрый синтез с использованием скалярных интегральных уравнений на основе уравнения ИФО позволяет получать хорошее при-

ближение для синтезируемого профиля сверхразмерного волноводного излучателя, которое может быть скорректировано медленной, но более точной процедурой на основе уравнения EFIE. Применение данного подхода позволяет заметно ускорить разработку сверхразмерных КО систем вывода СВЧ излучения мощных гиротронов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Реализован метод анализа и синтеза волноводных преобразователей с помощью интегрального уравнения электрического поля. Метод внедрен в процедуру синтеза благодаря естественной связи искомого электрического тока при решении уравнения EFIE и компонентов электромагнитных полей, определяющих поправку для синтезируемого профиля на каждой итерации процедуры синтеза.

2. Синтезирован и изготовлен уникальный квазиоптический преобразователь гиротрона на частоте 28 ГГц, содержащий волноводный излучатель, меняющий угловой спектр излучения рабочей моды. Высокая эффективность преобразователя подтверждена в эксперименте с высоким уровнем мощности 20 кВт.

3. Спроектирован квазиоптический преобразователь для многочастотного гиротрона 175–250 ГГц диапазона с направлением вывода излучения в два окна различной толщины. Расчет показывает высокую эффективность (96–98%) преобразования каждой из пяти рабочих мод в гауссов пучок при приемлемом уровне дифракционных потерь в 4–7% для 200 кВт уровня рабочей мощности.

4. Для излучателей гиротронов, сохраняющих узкий спектр углового распределения излучения рабочей моды, разработан и реализован быстрый численный метод на основе уравнения итерационной физической оптики с заменой реального профиля излучателя на соответствующий ему фазовый множитель. Скорость синтеза данным методом превышает точную процедуру на основе уравнения EFIE в сотни раз, что позволяет быстро получить первоначальное приближение для синтезируемой поверхности и значительно ускорить проектирование квазиоптических систем гиротронов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.G. Litvak, G.G. Denisov, et al., Development in Russia of Megawatt Power Gyrotrons for Fusion // *J. Infr. Millim. THz Waves*, vol. 32, no. 3, pp. 337–342, Mar. 2011, doi: 10.1007/s10762–010–9743–8.
2. J.L. Volakis, A. Chatterjee, L.C. Kempel, *Finite Element Method Electromagnetics, Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications*. Wiley–IEEE Press, June 1998, 368 p.

3. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation: 1966. Vol. 14. pp. 302–307. doi:10.1109/TAP.1966.1138693
4. W.C. Gibson, The Method of Moments in Electromagnetics. Boca Raton: CRC Press, 2021, 510 p., <https://doi.org/10.1201/9780429355509>.
5. W.C. Chew, J.–M. Jin, E. Michielssen, J. Song, Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics. Artech House. 2001. 932 p
6. А.А.Богдашов, Г.Г.Денисов. Асимптотическая теория высокоэффективных преобразователей высших волноводных мод в собственные волны открытых зеркальных линий. Российская академия наук, ИПФ РАН, Препринт №652, 2003, 32 стр.
7. А.В. Чирков, Г.Г. Денисов, М.Л. Кулыгин, В.И. Малыгин, С.А. Малыгин, А.Б. Павельев, Е.А. Солуянова, Использование принципа Гюйгенса для анализа и синтеза полей в сверхразмерных волноводах, Изв. вузов, Радиофизика, 2006, Т.59, № 5, с. 381-390
8. D.I. Sobolev and G.G. Denisov, Principles of Synthesis of Multimode Waveguide Units // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 38, no. 10, pp. 2825–2830, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPS.2010.2060365
9. F. Obelleiro–Basteiro, J. Luis Rodriguez, R. J. Burkholder, An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open–ended cavities // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 43, no. 4, pp. 356–361, April 1995, doi: 10.1109/8.376032
10. Г. Нуссбаумер. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свёрток. М.: Радио и связь, 1985.
11. A.V. Chirkov, G.G. Denisov, N.L. Aleksandrov, 3D Wavebeam Field Reconstruction from Intensity Measurements in a Few Cross Sections // Optics Communications, vol. 115, no. 5–6, pp. 449–452, 1995, doi: 10.1016/0030–4018(94)00630–D
12. A.S. Zuev, A.P. Fokin, A.A. Ananichev, E.S. Semenov, O.P. Plankin, A.N. Kufin, V.E. Zapevalov, M.Yu. Glyavin, Realization of an Octave Frequency Step–Tuning of Sub–terahertz Gyrotron for Advanced Fusion Research // J. Infr. Millim. THz Waves, vol. 42, no. 11, pp. 1131–1141, Nov. 2021, doi: 10.1007/s10762–021–00832–4

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1А. А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, С.В. Мишакин, С.В. Самсонов, Расчет и оптимизация трехмерных волноводных систем методом интегрального уравнения // Известия ВУЗов, Радиофизика, 2008, т. 51, №9, с. 742–753
- 2А. А.Р. Gashturi, G.G. Denisov, S.V. Mishakin, S.V. Samsonov, Calculation and optimization of 3D waveguide system with help of integral equation method // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009, vol. 30, no.4, pp. 319–327.

3А. A.V. Chirkov, A.P. Gashturi, G.G. Denisov, A.B. Paveliev, Comparison of different methods of calculation of gyrotron quasi-optical mode converter // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2013, vol. 34 No.1, pp 62–70.

4А. А.П. Гаштури, Д.И. Соболев, Анализ сверхразмерных электродинамических систем комбинированным методом на основе принципа физической оптики и метода мультипольного разложения // *Известия ВУЗов, Радиофизика*. 2022. Т. 65, № 5–6, с. 484–493

5А. S.A. Ananicheva, A.A. Bogdashov, A.P. Fokin, M.S. Gitlin, A.P. Gashturi, A.G. Luchinin, A.A. Orlovskiy, A.I. Tsvetkov, M.Yu. Glyavin, Imaging and Mode Content Analysis of the Wave Beam From a Short-Pulse High-Power Gyrotron Using the Millimeter-Wave-Induced Gas Breakdown Initiated by a Metal-Dielectric Screen // *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 51, Iss. 5, May 2023, pp. 1256 – 1260, DOI: 10.1109/TPS.2023.3264818

6А. А.П. Gashturi, A.S. Zuev, A.P. Fokin, D.I. Sobolev, A.V. Chirkov, E.M. Tai, A.N. Kuftin, M.Yu. Glyavin, G.G. Denisov, Development of a two-channel quasi-optical converter for a multi-frequency gyrotron in the range of 176–250 GHz // *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 71, Iss. 8, August 2024, pp. 5047 – 5052, DOI: 10.1109/TED.2024.3419764

7А. А.П. Gashturi, D.I. Sobolev, G.G. Denisov, M.D. Proyavin, M.V. Morozkin, A.V. Chirkov, Highly efficient gyrotron mode converter with a launcher changing angular spectrum of the operating mode // *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 71, no. 12, pp. 7831–7835, Dec. 2024, doi: 10.1109/TED.2024.3479157

8А. А.П. Гаштури, М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, И.В. Железнов, И.В. Зотова, В.Н. Мануилов, С.В. Самсонов, А.С. Сергеев, Разработка циклотронно-резонаторного выпрямителя миллиметрового диапазона для перспективных систем беспроводной передачи энергии // *Журнал радиоэлектроники*, 2025. №3, eISSN 1684–1719. <https://doi.org/10.30898/1684–1719.2025.3.14>

9А. А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев, Радикальное ускорение метода синтеза волноводных излучателей гироприборов на основе уравнения итерационной физической оптики // *Известия ВУЗов, Радиофизика*, 2025, Т. 68, № 3, с. 226–230

10А. А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, С.В. Мишакин, С.В. Самсонов, Расчет сверхразмерных волноводных систем методом интегрального уравнения, // аннотации докладов 12-й Нижегородской сессии молодых ученых. Н.Новгород, 15–20 апреля 2007 г.

11А. А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, Г.И. Калынова, А.В. Чирков, Расчет открытых волноводных систем методом интегрального уравнения // Аннотации докладов 13-й Нижегородской сессии молодых ученых. Н.Новгород, 20–25 апреля 2008 г.

12А. G.G. Denisov, A.P. Gashturi, S.V. Mishakin, S.V. Samsonov, Calculation of 3-D waveguide structures with EFIE // 2007 Joint 32nd Int. Conf. on Infra-

red and Millimeter Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, pp. 779–780, doi: 10.1109/ICIMW.2007.4516727.

13A. G.G. Denisov, A.V. Chirkov, V.I. Belousov, A.P. Gashturi, G.I. Kalynova Synthesized Quasi–Optical TE₀₂–HE₁₁ Mode Converter // Conf. Digest of the Joint 34nd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Busan, Korea, September 21 – 25, 2009, pp. 1–2, doi: 10.1109/ICIMW.2009.5324950.

14A. D.I. Sobolev, G.G. Denisov, A.P. Gashturi, Fast and efficient synthesis of multimode waveguide components // 17th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, 2012.

15A. A.P. Gashturi, D.I. Sobolev, G.G. Denisov, Synthesis of multimode waveguide converters using full-wave EFIE field analysis method // 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW–THz), Mainz, Germany, Sep 1–6, 2013, pp. 1–2, doi: 10.1109/IRMMW–THz.2013.6665489.

16A. А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев, Эффективный метод синтеза трехмерных электродинамических систем // X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 29 февраля – 3 марта 2016 г.

17A. А.П. Гаштури, М.Б. Гойхман, А.В. Палицин, А.Н. Панин, Родин Ю.В., «Перестраиваемый режекторный фильтр для диагностики ультракоротких СВЧ импульсов большой мощности // XVII Всероссийская школа–семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова, май 2019

18A. A.P. Gashturi, M.B. Goykhman, A.V. Gromov, S.E. Filchenkov, A.V. Palitsin, A.N. Panin, Yu.V. Rodin, N.Yu. Peskov, R.M. Rozental, Tunable Notch Filter for Measurements of Rogue Waves in Gyrotrons // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW–THz), Sept 1–6, 2019, Paris, France, doi: 10.1109/IRMMW–THz.2019.8874064

19A. A.P. Gashturi, M.B. Goykhman, A.V. Gromov, S.E. Filchenkov, A.V. Palitsin, Yu.V. Rodin, N.Yu. Peskov, R.M. Rozental, D.I. Sobolev, Tunable Waveguide Notch Filter for Plasma Diagnostics // 7th All–Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia, 2020, pp. 21–24, doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312347

20A. A.P. Gashturi, A.V. Palitsin, M.B. Goykhman, A.V. Gromov, A.N. Panin, M.D. Proyavin, Yu.V. Rodin, Microwave Notch Filters for Plasma Diagnostics, Numerical Simulation by Method of Moments with Mode Matching // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW–THz), Chengdu, China, 2021, pp. 1–2, doi: 10.1109/IRMMW–THz50926.2021.9567076

21A. А.П. Гаштури, Д.И. Соболев, Анализ сверхразмерных электродинамических систем комбинированным методом на основе принципа физической оптики и метода мультипольного разложения // XII Всероссийский семинар

по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 28 февраля – 4 марта 2022 г.

22А. А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев, Проектирование сверхразмерных открытых волноводных преобразователей комбинацией методов оптимального синтеза и интегрального уравнения EFIE // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 30 мая – 3 июня 2022 г., с. 66–70

23А. А.П. Гаштури, Д.И. Соболев, Г.Г. Денисов, Высокоэффективный квазиоптический гиротронный преобразователь моды с малым углом Бриллюэна в гауссов пучок // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 29 мая – 2 июня 2023 г., с. 218–222

24А. А.П. Гаштури, М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, А.С. Зуев, Д.И. Соболев, А.П. Фокин, Проект многочастотного гиротрона-драйвера со специальным преобразователем // Тезисы XX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Сочи, 18–22 сентября 2023

25А. А.В. Палицин, Ю.В. Родин, М.Б. Гойхман, А.В. Громов, А.П. Гаштури, М.Д. Проявин, А.Н. Панин, Волноводный режекторный фильтр для микроволновой диагностики плазмы // Тезисы XX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Сочи, 18–22 сентября 2023, 292–294

26А. A.P. Gashturi, G.G. Denisov, A.P. Fokin, M.Yu. Glyavin, D.I. Sobolev, A.S. Zuev, Synthesized Quasi-optical Converter for 175–250 GHz Gyrotron with Two Output Windows // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Chengdu, China, 21–25 April, 2024, doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10617996

27А. G.G. Denisov, D.I. Sobolev, M.D. Proyavin, A.P. Gashturi, M.V. Morozkin, V.E. Kotomina, M.V. Kamenskiy, A.A. Orlovskiy, Compact and Efficient Output Converter for Gyrotron Mode with High Longitudinal Wave Number // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Chengdu, China, 21–25 April, 2024, pp. 1–4, doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618489

28А. E.S. Semenov, A.S. Zuev, O.P. Plankin and A.P. Gashturi, The code ANGEL as a universal tool for gyrodevices modeling // FNP–2024, Russia, Sept 2024

29А. А.П. Гаштури, Г.Г. Денисов, Д.И. Соболев, Проектирование излучателей гиротрона с помощью интегральных уравнений для поверхностного тока // XIII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Тезисы докладов. 24–28 февраля 2025 г., Нижний Новгород

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	3
ГЛАВА 1. Методы граничных элементов для 3-мерного анализа сверхразмерных систем	16
1.1. Векторные интегральные уравнения EFIE, MFIE и CFIE.....	17
1.2. Уравнение EFIE применительно к открытым волноводам.....	19
1.3. Метод моментов для решения уравнения EFIE.....	21
1.4. Алгоритм многоуровневого мультипольного разложения MLFMA.....	27
1.5. Приближение физической оптики для зеркальных линий.....	33
1.6. Гибридный метод расчета квазиоптических преобразователей гиротрона.....	36
1.7. Примеры расчетов.....	37
1.7.1. Расчет гиротрона 140 ГГц гибридным методом.....	37
1.7.2. Анализ модового состава излучения гиротрона 530 ГГц.....	40
ГЛАВА 2. Комбинация метода синтеза и интегрального уравнения EFIE	45
2.1. Формулировка процедуры оптимального синтеза.....	45
2.2. Связь физических величин в методе синтеза и уравнения EFIE.....	48
2.3. Квазиоптический преобразователь для гиротрона 28 ГГц.....	51
2.3.1. Проблема излучения рабочей моды с большим продольным волновым числом.....	51
2.3.2. Концепция волноводного излучателя, меняющего угловой спектр моды.....	54
2.3.3. Синтез профиля излучателя.....	56
2.3.4. Изготовление и экспериментальное исследование квазиоптического преобразователя.....	58
ГЛАВА 3. Синтез широкополосных волноводных излучателей	61
3.1. Адаптация процедуры синтеза для многочастотного случая.....	61
3.2. Проект двунаправленного квазиоптического преобразователя для гиротрона 175–250 ГГц.....	62
3.3. Дополнительные замечания к синтезу многочастотных излучателей гиротронов.....	71
ГЛАВА 4. Оптимизация процедуры синтеза волноводных излучателей в комбинации с методами интегральных уравнений	75
4.1. Метод итерационной физической оптики (ИФО) для анализа электромагнитного поля в сверхразмерных волноводах.....	75
4.2. Приведение векторного уравнения ИФО к системе скалярных уравнений для случая узкого углового спектра излучения. Радикальное ускорение синтеза для данной задачи.....	79
Заключение	87
Публикации по теме диссертации	88
Список цитируемой литературы	93

Гаштури Антон Петрович

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ГИРОПРИБОРОВ
МЕТОДАМИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 23.06.2025 г.

Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 19(2025)

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46