

На правах рукописи

Ошарин Иван Владимирович

**СЕЛЕКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ
ВЫСОКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИК
И ВЫСОКИХ ПРОДОЛЬНЫХ МОД
В ГИРОПРИБОРАХ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

01.04.03 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Савилов Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Лукша Олег Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;

Куркин Семен Андреевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ РАН, г. Москва).

Защита состоится «30» сентября 2019 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д002.069.02 при ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН».

Автореферат разослан «15» июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

Одним из важных направлений развития современной прикладной физики является создание источников когерентного электромагнитного излучения, работающих на относительно высоких уровнях мощности, и активное их продвижение в субтерагерцовый и терагерцовый частотные диапазоны. Это вызвано потребностями в таких источниках в ряде важных и перспективных фундаментальных и практических приложений. Тут можно упомянуть, например, их применение в установках термоядерного синтеза для нагрева и диагностики плазмы [1], диагностику различных сред [2], современные ускорительные [3], спектроскопические, биохимические и биофизические [4] приложения (в частности, динамическая поляризация ядерных спинов в спектроскопии ядерного магнитного резонанса [5]), и т.д.

Большинство таких приложений требует как повышения частоты излучения, так и увеличения выходной мощности создаваемых источников. С точки зрения сочетания компактности и доступности потребителю (с одной стороны) и высоких КПД и мощности выходного излучения (с другой стороны) во многих случаях наиболее перспективным вариантом является гиротрон – разновидность мазеров на циклотронном резонансе, основанная на возбуждении квазикритических мод волноводных резонаторов винтовыми электронными пучками [6]. Главные достоинства гиротрона обусловлены именно работой на квазикритических волнах, поскольку это обеспечивает высокую эффективность электронно-волнового взаимодействия, а также слабую чувствительность гиротрона к скоростному разбросу частиц в пучке. Кроме того, высокая дифракционная добротность таких волн даже в открытых резонаторах обеспечивает их селективное возбуждение без каких-либо дополнительных элементов обратной связи.

Результатом развития гиротронов [7-13] стало создание высокоэффективных источников излучения с рекордными мощностями, достигнутыми в различных диапазонах (более 1 МВт в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн [9], сотни кВт в субмиллиметровом диапазоне [10-11] и киловаттный уровень мощности в терагерцовом диапазоне [12-13]). В то же время, процесс создания современных коротковолновых гиротронов нередко сопряжен с необходимостью решения новых физических задач и исследования новых схем и режимов работы приборов, что обусловлено как стремлением реализовать гиротроны с уникальными характеристиками, так и нуждами развивающихся приложений. Прежде всего, тут следует упомянуть использование в гиротронах генерации на высоких циклотронных гармониках (что в настоящее время практически неизбежно при реализации длинноимпульсных и непрерывных генераторов в терагерцовом частотном диапазоне), а также создание низковольтных гиротронов с относительно низкими уровнями выходной мощности, которые выглядят весьма

привлекательно с точки зрения их использования в некоторых (например, спектроскопических) приложениях.

В таких режимах работы перечисленные выше достоинства гиротронов в какой-то мере превращаются в недостатки. В гиротронах с относительно слабым электронно-волновым взаимодействием (что может быть обусловлено как относительно низкими уровнями мощности и тока рабочего электронного пучка, так и работой на высокой гармонике циклотронной частоты) для старта рабочих колебаний приходится использовать протяженные (десятки длин волн) резонаторы. В таких системах дифракционная добротность рабочих волн может существенно превышать их омическую добротность, что приводит к поглощению большей части излучения электронного пучка в стенках резонатора. Попытка же перейти к работе на относительно далеких от отсечки продольных модах, обладающих пониженными дифракционными добротностями, приводит, как правило, к существенному снижению эффективности гиротрона.

Высокая селективность возбуждения квазикритической волны затрудняет частотную перестройку гиротрона даже в относительно узкой полосе. Кроме того, при переходе к работе на высоких гармониках циклотронной частоты сопутствующее этому переходу ослабление электронно-волнового взаимодействия (сопровождающееся, как правило, необходимостью удлинения рабочего резонатора) приводит к проблеме селективности возбуждения высоких гармоник и, соответственно, подавления паразитных колебаний, возбуждающихся на низких гармониках.

Настоящая работа направлена на исследование новых схем гиротронов, которые разрабатываются с целью решения описанных выше проблем.

Цели диссертационной работы

Основными целями диссертационной работы являются:

1. Изучение особенностей процессов электронно-волнового взаимодействия в субтерагерцовых гиротронах с относительно слабым электронно-волновым взаимодействием (низкие рабочие токи, работа на высоких гармониках циклотронной частоты). Исследование новых схем гиротронов как путь повышения электронного и выходного КПД в таких гиротронах.

2. Исследование новых схем гиротронов с повышенной селективностью возбуждения высоких циклотронных гармоник.

3. Исследование особенностей электронно-волнового взаимодействия в маломощных коротковолновых гиротронах с низкими энергиями рабочих электронов.

4. Разработка численных кодов, моделирующих пространственно-временную динамику возбуждения гиротронов. Разработка и расчет экспериментальных макетов гиротронов терагерцового частотного диапазона, включая гиротроны со сложными микроволновыми системами.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. В резонаторе с периодическими фазовыми корректорами электронно-волновое взаимодействие на резонансе гиротронного типа (т.е. на циклотронном резонансе без доплеровского преобразования частоты) осуществляется не с нижней продольной модой резонатора, а с модой, число аксиальных вариаций которой совпадает с числом резонаторных секций.

2. В гиротроне, работающем на высокой циклотронной гармонике, короткое расширение стенки резонатора (фазовый корректор), обеспечивающее для рабочей квазикритической волны гиротрона набег фазы, равный 2π , может использоваться в качестве селективирующего элемента, обеспечивающего существенное увеличение стартового тока паразитной волны, возбуждающейся на основном циклотронном резонансе, без заметного влияния на взаимодействие электронного пучка с рабочей волной.

3. Особенностью гиротронов с низкими ускоряющими напряжениями рабочих электронных пучков является широкая область параметров, в которой возможна устойчивая генерация высоких продольных мод в режиме «лампа бегущей волны» (т.е. когда электроны взаимодействуют с попутной бегущей компонентой стоячей резонаторной волны).

4. При относительно большой отстройке рабочего магнитного поля от резонансного значения в гиротроне может реализовываться сложный режим возбуждения, характеризующийся тем, что в течение переходного процесса происходит смена генерируемой моды и, следовательно, частоты выходного СВЧ сигнала. Такие режимы могут быть использованы для формирования мощного короткого СВЧ импульса в результате компрессии двухчастотного выходного сигнала. Еще одним следствием существования такого типа режимов возбуждения может быть существенное отличие переходных процессов в гиротронах с попутным и встречным выводами СВЧ сигнала из резонатора.

Научная новизна:

1. Предложена и исследована схема гиротрона с секционированным резонатором с фазовыми корректорами, обеспечивающая эффективное гиротронное возбуждение относительно далеких от отсечки продольных мод.

2. Предложены и исследованы гиротронные резонаторы с короткими селективирующими элементами, обеспечивающими повышенную селективность возбуждения высоких циклотронных гармоник.

3. Выявлены особенности частотной перестройки в различных схемах гиротронов с низкими ускоряющими напряжениями рабочих электронных пучков.

4. Разработан и рассчитан ряд экспериментальных макетов терагерцовых гиротронов со сложными микроволновыми системами.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость работы обусловлена ее направленностью на создание субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов с относительно высокими уровнями мощности, включая гиротроны, работающие на высоких гармониках циклотронной частоты. Применение предложенных в данной работе методов и подходов позволит создать новые приборы с уникальными характеристиками.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на 40-43-й Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Гонконг, Китай, 2015; Копенгаген, Дания, 2016; Канкун, Мексика, 2017, Нагоя, Япония, 2018), 18-й Международной конференции по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2017), 32-й Генеральной ассамблее Международного Радиофизического Союза (Монреаль, Канада, 2017), 28 совместном Российско-Германском семинаре по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Нижний Новгород, 2016), 26-27-й Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016, 2017), Международном семинаре по мощным СВЧ-источникам и их приложениям (Нижний Новгород, 2017), 15-й и 17-й Всероссийских школах-семинарах «Физика и применение микроволн» (Можайск, 2015, 2017), 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2018), 18-й научной школе «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, 2018), 3-й Международной конференции «Терагерцовое и СВЧ излучение: генерация, детектирование и приложения (ТЕРА-2018)» (Нижний Новгород, 2018).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 35 работ, из которых 15 статей [1а – 15а] опубликовано в рецензируемых российских и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК, и 20 работ в материалах российских и международных конференций [16а – 35а].

Личный вклад автора в проведенные исследования

Все результаты исследований, приведенные в диссертации и вошедшие в работы [1а-35а], получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании электронно-волнового взаимодействия в гиротронных резонаторах различных конфигураций, построении теоретических моделей гиротронов со сложными электродинамическими системами, численном моделировании процессов электронно-волнового взаимодействия. На основе оригинальных численных кодов, написанных автором, был спроектирован и рассчитан ряд

экспериментальных макетов терагерцовых гиротронов со сложными микроволновыми системами. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка трудов по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 161 страницу, включая 67 иллюстраций, 2 таблицы, список литературы из 181 наименования и список трудов по теме диссертации из 35 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первая глава посвящена исследованию новых методов понижения дифракционной добротности протяженных резонаторов гиротронов на высоких гармониках, работающих в терагерцовом частотном диапазоне. В таких гиротронах для обеспечения старта возбуждения на более высокой циклотронной гармонике требуется увеличение длины рабочего резонатора. В этой ситуации приходится использовать протяженные (десятки длин волн) резонаторы, так что дифракционная добротность рабочей волны Q_{dif} становится сравнимой с ее омической добротностью (или даже может ее существенно превышать). Согласно оценке [8]

$$Q_{dif} \approx 8\pi(L/\lambda)^2. \quad (1)$$

В то же время, согласно [8], омическая добротность квазикритической TE моды с собственным числом μ и азимутальным индексом m определяется следующей формулой:

$$Q_{ohm} \approx 700 \times \mu \times \left(1 - \frac{m^2}{\mu^2}\right) \times \sqrt{\lambda(\text{мм})} \quad (2)$$

Даже при длине резонатора $L/\lambda = 20$ дифракционная добротность рабочей моды согласно оценке (1) составит $Q_{dif} \approx 10000$, что при омической добротности того же порядка соответствует ситуации, когда половина СВЧ мощности, излучаемой электронным пучком, теряется в стенках резонатора. При длине резонатора $L/\lambda = 30$ дифракционная добротность рабочей моды составит $Q_{dif} \approx 23000$, и при омической добротности $Q_{ohm} \approx 10000$ это будет означать, что омические потери (доля излучаемой электронным пучком мощности, потерянная в стенках резонатора) окажется равной уже 70%. Основой описанных в первой главе подходов, направленных на решение

данной проблемы, является использование гиротронных резонаторов секционированного типа, в которых обеспечивается пониженная дифракционная добротность гиротронной волны.

Основные уравнения, на основе которых были разработаны численные коды для исследования нестационарной пространственно-временной динамики возбуждения и установившихся режимов гиротронов, приведены в параграфе 1.1 главы.

Моделирование пространственно-временной динамики гиротрона проводилось на основе нестационарного уравнения для медленной комплексной амплитуды $a(t, z)$ поля $TE_{m,p}$ -моды в резонаторе [14]:

$$2ik \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + \left(k^2 \left(1 - \frac{i}{Q_{ohm}}\right) - k_{\perp}^2\right)a + J(t, z), \quad 0 < z < L, \quad (3)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$, ω – циклическая частота собственной моды резонатора, соответствующей рабочему колебанию, $k_{\perp} = \mu_p / R(z)$ – поперечное волновое число этой моды, μ_p – соответствующий нуль производной функции Бесселя $J_m(x)$, так что $J'_m(\mu_p) = 0$, $R(z)$ – радиус резонатора, Q_{ohm} – омическая добротность собственной моды.

Микроволновая система гиротрона состоит из регулярного (или квази-регулярного, как показано на рис. 2) резонатора длиной L , в котором рабочая волна имеет квазикритический характер, а также выходного рупора, через который осуществляется вывод излучения (рис. 1).

Возбуждающий ток $J(t, z)$ в правой части (3) находился методом крупных частиц, для чего решались усредненные по циклотронному периоду уравнения движения электронов в высокочастотном поле [7-8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma}{\partial z} &= K \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}} J'_N(\xi) \operatorname{Im} a \exp(-i\theta), \\ \frac{\partial p_{\perp}}{\partial z} &= K J'_N(\xi) \left[\frac{\gamma}{p_{\parallel}} \operatorname{Im} a \exp(-i\theta) - \frac{1}{k} \operatorname{Re} \frac{\partial a}{\partial z} \exp(-i\theta) \right] + \frac{p_{\perp}}{2bk} \frac{\partial b}{\partial z}, \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \frac{Nb - k\gamma}{p_{\parallel}} + K J_N(\xi) \frac{N\gamma}{p_{\parallel} p_{\perp}} \times \\ &\times \left[\left(\kappa \frac{p_{\perp}}{\gamma} - \frac{N}{\xi p_{\perp}} \right) \operatorname{Re} a \exp(-i\theta) - \frac{N p_{\parallel}}{k \xi \gamma p_{\perp}} \operatorname{Im} \frac{\partial a}{\partial z} \exp(-i\theta) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где γ – релятивистский масс-фактор, $p_{\perp, \parallel} = \gamma V_{\perp, \parallel} / c$ – поперечная и продольная компоненты нормированного импульса, θ – медленная фаза вращающегося в магнитном поле электрона относительно волны, N – номер

рабочей циклотронной гармонике, $K = kk_{\perp} J_{m-N}(k_{\perp} R_e)$ – коэффициент связи электронов с полем, R_e – радиус электронного пучка, $b = eB/Mc^2$ – нормированное продольное магнитное поле, $\xi = \kappa p_{\perp} / b$ – нормированный ларморовский радиус. При решении использовалось приближение быстрого (по сравнению с характерным временем эволюции поля) пролета частиц через резонатор, когда в уравнения (4) на всей траектории частицы входит амплитуда $a(t, z)$ в фиксированный момент времени t , а возбуждающий ток $J(t, z)$, соответствующий этому же моменту времени, находится путем суммирования частичных токов:

$$F(t, z) = G \left\langle \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}} J'_N(\xi) \exp(i\theta) \right\rangle,$$

где $G = 4(eI/Mc^3)kK/S_{\perp}$, I – ток пучка, $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по всему электронному ансамблю. Начальные условия для уравнений движения соответствовали перемешанному по giroфазам моноэнергетическому пучку с некоторым разбросом поперечных скоростей.

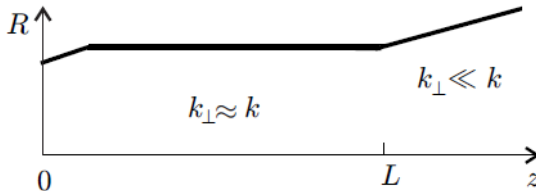


Рис. 1. Используемая в расчетах модель микроволновой системы гиротрона

Для класса гиротронов, в которых КПД электронно-волнового взаимодействия невелик, а влияние т.н. «силового» члена на группировку частиц в поле волны мало, удобно использовать универсальные уравнения движения так называемой «длинноприборной» асимптотики [15], приведенные в п. 1.1.2. Универсальность таких уравнений (в том числе – минимизация числа параметров системы) делает их удобными для общего анализа ряда задач.

Уравнения движения частиц в высокочастотном поле волны решались методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Для решения уравнения для медленной амплитуды поля, представляющего собой параболическое дифференциальное уравнение в частных производных, использовался неявный метод конечных разностей. Выбор чисто неявной схемы, более сложной с точки зрения реализации по сравнению с явными схемами, обусловлен ее сходимостью к точному решению, а также ее абсолютной устойчивостью, то есть выбор временного шага происходит только из соображений точности [16].

Параграф 1.2 посвящен исследованию достаточно простого и технологичного метода снижения дифракционной добротности рабочей гиротронной волны, основанного на использовании резонатора с периодической системой фазовых корректоров [1а, 4а-5а], представляющих собой расширение резонатора (рис. 2). Параметры каждого фазового корректора (ширина и увеличение радиуса) подбираются так, чтобы обеспечить набег фазы $\delta\phi \approx \pi$ для квазикритических волн, что эквивалентно смене знака волны в месте расположения фазового корректора. В таком секционированном резонаторе гиротронный режим электронно-волнового взаимодействия реализуется не для низшей аксиальной моды, а для моды с более высоким аксиальным индексом, который совпадает с числом секций резонатора. Такая мода имеет существенно меньшую дифракционную добротность по сравнению с низшей продольной модой регулярного резонатора.

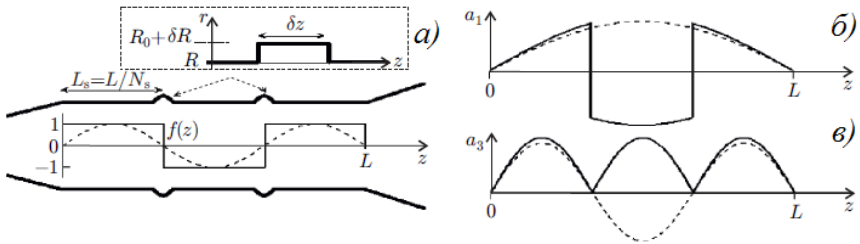


Рис. 2. Резонатор, состоящий из трёх секций, и функция $f(z)$, описывающая сдвиги фазы волны $\pi n\delta$ между секциями (а). Продольные структуры мод с индексами $n = 1$ (б) и $n = 3$ (в) в регулярном (штриховые кривые) и в секционированном (сплошные кривые) резонаторе.

Качественное исследование гиротронного возбуждения высоких продольных мод в квазирегулярных резонаторах было проведено на основе асимптотических уравнений движения электронов, достаточно корректных для гиротронов с протяженными резонаторами, работающих на высоких циклотронных гармониках с относительно низким КПД. В нелинейном моделировании были использованы уравнения движения с пространственно-временным уравнением для волны. Моделирование было проведено для гиротрона с параметрами, близкими к параметрам экспериментально реализованного терагерцового слабoreлятивистского (80 кВ, 0.7 А) гиротрона с большой орбитой, работающего на третьей циклотронной гармонике на относительно высокой поперечной моде $TE_{3,7}$ [13]. Моделирование показало, что использование рабочих волн с пониженной дифракционной добротностью позволяет значительно увеличить выходной КПД в силу заметного снижения доли омических потерь. Так, эта доля падает с 85–90% в регулярной системе до 20% в секционированном резонаторе при возбуждении аксиальной моды с пятью вариациями в гиротронном режиме.

Возможность использования секционированных резонаторов с фазовыми корректорами в гиротронах исследовалась для параметров слаборелятивистских непрерывного и импульсного гиротронов с большой орбитой (ГБО). Для импульсного ГБО показано, что использование секционированных систем слегка уменьшает электронный КПД (с 10% до 7.5%), однако выходная мощность увеличивается из-за понижения дифракционной добротности возбуждаемых волн и, следовательно, снижения омических потерь. Описанный подход к проблеме снижения дифракционной добротности был использован для проектирования непрерывного маломощного гиротрона (30 кВ / 0.7 А) на частоте 0.5 ТГц [4а, 11а]. Для этой установки были спроектированы и детально промоделированы трех- (рис. 3) и пятисекционный (рис. 4) резонаторы (в зависимости от итоговых параметров рабочего электронного пучка) с значительно меньшей дифракционной добротностью. В ходе моделирования было показано, что схема с коррекцией фазы обеспечивает трехкратный выигрыш в выходной мощности по сравнению с традиционной схемой. Кроме того, расчеты предсказывают низкую чувствительность генерации к ошибкам изготовления фазовых корректоров.

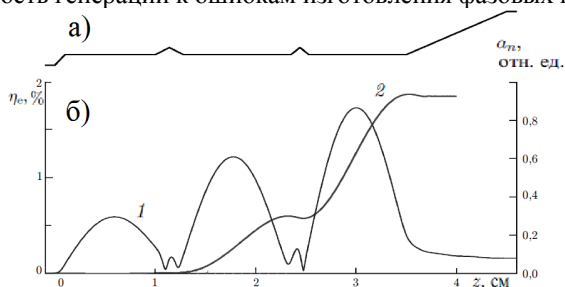


Рис. 3. Результаты моделирования слаборелятивистского гиротрона с фазовыми корректорами. Приведены оптимизированный профиль резонатора (а) и соответствующая ему продольная структура поля рабочей моды $TE_{4,8}$ (кривая 1), а также зависимость электронного КПД η_{el} от продольной координаты (кривая 2).

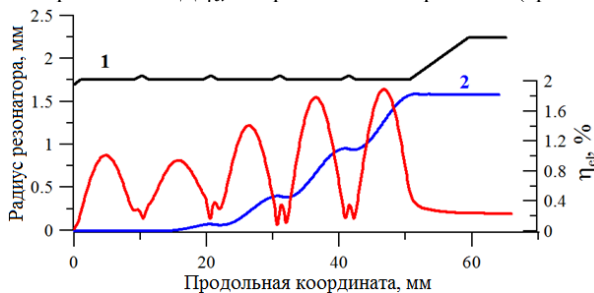


Рис. 4. Результаты моделирования слаборелятивистского гиротрона с фазовыми корректорами. Приведены оптимизированный профиль резонатора (кривая 1) и соответствующая ему продольная структура поля рабочей моды $TE_{4,5}$, а также зависимость электронного КПД η_{el} от продольной координаты (кривая 2).

Во **второй главе** приводятся методы повышения селективности возбуждения рабочей циклотронной гармоники, основанных на использовании квазирегулярных резонаторов с фазовыми корректорами [2а, 7а], а также двухпучковой гиротронной схемы [29а]. Достаточно простой метод подавления паразитной генерации на первой циклотронной гармонике, приведенный в **параграфе 2.1** главы, основан на использовании резонатора с одной или несколькими неоднородностями (фазовыми корректорами). Параметры каждой такой неоднородности подбираются таким образом, чтобы обеспечить на ней набег фазы, близкий π для квазикритических волн с частотой, близкой с циклотронной частоте электронов рабочего пучка гиротрона. Такой скачок фазы соответствует резкому переходу электронного сгустка, сформированному резонансным полем возбуждаемой на основном циклотронном резонансе электромагнитной волны, из тормозящей фазы в ускоряющую, что приводит к «смене знака» электронно-волнового взаимодействия (рис. 4), то есть переходу от излучения волны к ее поглощению. В то же время для волн на удвоенной частоте та же самая неоднородность обеспечивает вдвое больший набег фазы (т. е. близкий 2π), что в первом приближении соответствует отсутствию влияния таких неоднородностей на эффективность возбуждения рабочей волны на второй гармонике.

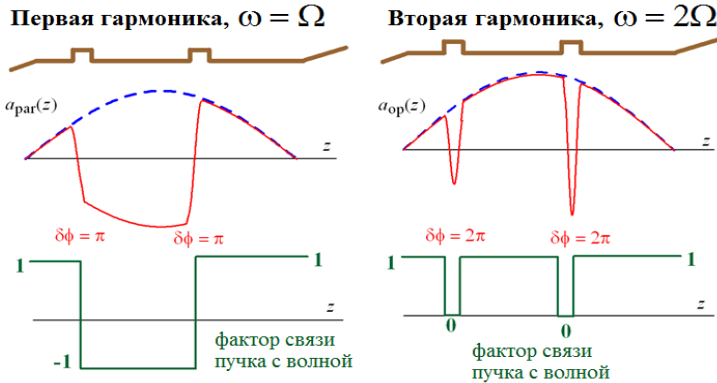


Рис. 5. Схематическое изображение преобразования продольных структур рабочей моды, возбуждаемой на второй гармонике, и паразитной моды, возбуждаемой на основном циклотронном резонансе, в резонаторе с двумя фазовыми корректорами. Показана также смена знака функции, описывающей электронно-волновое взаимодействие, обусловленная наличием фазовых корректоров.

В п. 2.1.2 описана модель, на основе которой проведен анализ конкуренции двух разночастотных волн, возбуждаемых на разных циклотронных гармониках. Фактически, она представляет собой обобщение описанной в разделе I.1 самосогласованной модели с универсальными асимптотическими уравнениями движения на случай взаимодействия электронов одновременно с двумя волнами.

Поскольку рабочая и паразитная волны имеют разные частоты, они возбуждаются независимо, тогда как взаимодействие между двумя волнами возникает только в нелинейном режиме. Таким образом, можно исследовать взаимодействие двух волн с пучком по отдельности. Если добротности волн достаточно велики, можно использовать приближение, в котором продольная структура каждой волны фиксирована и совпадает с «холодной» структурой продольной моды закрытого резонатора. Уравнения движения рассматривались в приближении фиксированной продольной структуры поля в случае, когда возбуждается только паразитная волна. Анализ, приведенный в п. 2.1.3, показал, что присутствие одного фазового корректора соответствует уменьшению стартового тока паразитной волны на первой гармонике в 3-4 раза в зависимости от расстройки паразитной волны. При наличии двух нерегулярностей стартовые токи паразитной волны увеличиваются в 5-8 раз. Следует подчеркнуть, что присутствие двух нерегулярностей не меняет стартовый ток рабочей волны на второй гармонике, поскольку для нее набег фазы равен π в приближении бесконечно малой длины фазового корректора.

Подробное моделирование конкуренции волн, возбуждаемых на второй гармонике и на основном циклотронном резонансе, учитывающее совместное взаимодействие (конкуренцию) двух волн на нелинейной стадии работы гиротрона проведено в п. 2.1.4. Моделирование показало, что использование резонатора с одним фазовым корректором увеличивает стартовый ток паразитной волны в 4-8 раз по сравнению с регулярной системой. Использование резонатора с двумя нерегулярностями увеличивает стартовый ток «паразита» до примерно 30 раз по сравнению с регулярной системой. Лучшее подавление паразитной волны, предсказываемое нелинейным двухволновым моделированием, может быть объяснено влиянием конкуренции между рабочей и паразитной волной.

Возможность применения описанного метода повышения селективности в конкретной системе – релятивистском гиротроне [17] на второй циклотронной гармонике, работающем в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. Исследовался электронный циклотронный мазер с трубчатым релятивистским электронным пучком (напряжение – 280 кэВ, ток – до 50 А, средний пич-фактор электронов – 1,3). Моделирование показало, что в квазирегулярном резонаторе обеспечивается селективная генерация на второй циклотронной гармонике сразу в двух диапазонах рабочих полей. Расчеты предсказывают достижение КПД генерации рабочих волн на уровне 10% при токах 10-20 А.

При разработке квазирегулярного резонатора следует учесть, что нерегулярность может быть источником нежелательного рассеяния рабочей моды в низшие поперечные моды. Подробное исследование этой проблемы приведено в параграфе 2.2. Предложенный метод подавления паразитных низкочастотных колебаний на первой гармонике основан на одномодовом

приближении, когда корректор представлен достаточно коротким расширением радиуса резонатора и для определения сдвига фазы волны может быть использовано приближение Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. Этот подход может быть использован в достаточно длинных резонаторах при низких модах. Однако при достаточно коротком резонаторе для рабочих мод с высокими радиальными индексами, что типично для гиротронов субмиллиметрового диапазона, такой подход не может быть реализован. Это связано с тем, что ограничение максимальной длины корректора накладывает ограничение на его минимальную глубину. В п. 1.2.1 предложена модификация предложенного метода [7а]. В данном случае, как и ранее, в качестве селективного элемента предлагается использовать прямоугольную канавку на стенке резонатора (рис. 6). Если радиус резонатора внутри канавки близок к критическому для одной из мод, радиальный индекс которой на единицу больше радиального индекса рабочей моды, а азимутальный индекс такой же, как у рабочей, тогда, выбрав ширину канавки, возможно достигнуть почти полного отсутствия рассеяния рабочей моды на такой нерегулярности. Описанный элемент является резонансным и, таким образом, обеспечивает отсутствие рассеяния только для конкретной моды. В результате паразитные волны, возбуждаемые на основном циклотронном резонансе, имеющие вдвое меньшее поперечное волновое число, будут испытывать сильное рассеяние на канавке, что приводит к уменьшению их добротности, искажению их продольной структуры и увеличению их стартовых токов.

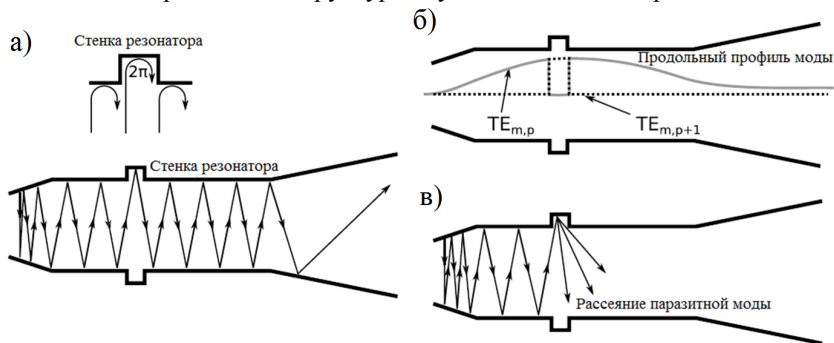


Рис. 6. Объяснение механизма селекции с точки зрения бриллюэновского подхода (а) и резонатора с трансформацией мод (б). Проиллюстрировано рассеяние паразитных мод (в).

В п. 2.2.2 приведена модификация регулярного резонатора реализованного в ИПФ РАН гиротрона с частотой 670 ГГц, работающего на возбуждаемой на основном циклотронном резонансе моде $TE_{31,8}$ [10]. Анализ спектра собственных мод резонатора показывает, что в рабочем диапазоне магнитных полей возможен резонанс на второй циклотронной гармонике с модой $TE_{63,15}$ на частоте около 1.3 ТГц. Чтобы продемонстрировать метод,

было предложено использовать канавку глубиной 0.12 мм в резонаторе, радиус которого 4.54 мм. Моделирование этой системы проведено с помощью метода конечных элементов в двумерной области. Выбирая геометрию канавки, можно достичь почти полного отсутствия ее влияния на возбуждение моды $TE_{63,15}$, сохраняя как добротность этой моды, так продольный профиль поля по отношению к электронному пучку. Расчет стартовых токов подтверждает эффективность подавления паразитных мод в предложенном резонаторе. Деформация низкочастотных мод оказалась настолько сильной, что их стартовые токи стали в несколько раз выше, чем практически не изменившийся стартовый ток рабочей моды на второй гармонике (рис. 7).

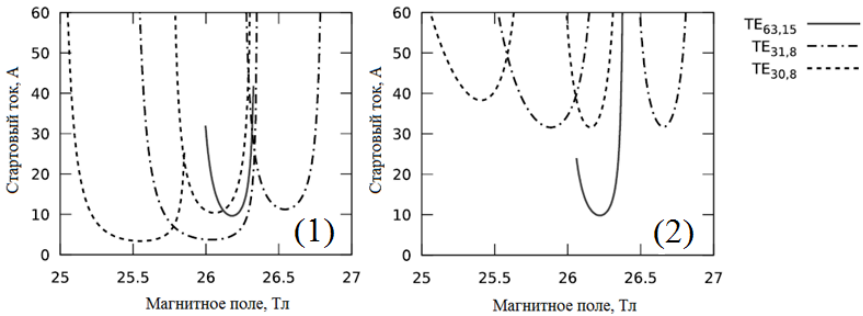


Рис. 7. Стартовые токи мод на первой и второй циклотронных гармониках в регулярном резонаторе гиротрона с частотой 670 ГГц (1), а также в резонаторе с селективной канавкой (2).

Параграф 2.3 посвящен исследованию подавления низкочастотных паразитных колебаний, возбуждаемых на основном циклотронном резонансе, в работающих на второй гармонике гиротронах с двумя электронными пучками [18-19, 29а]. В разделе проведен анализ двух подходов к использованию двухпучковой схемы. В этом случае два пучка инжектируются в два максимума фактора связи пучка с полем рабочей волны на высокой гармонике. В первом случае предполагалось, что один из двух пучков является прямолинейным. Для такого двухпучкового гиротрона была получена аналитическая оценка для тока поглощающего пучка «2», необходимого для заметного повышения стартового тока возбуждения излучающим пучком «1» паразитной квазикритической волны на основном циклотронном резонансе:

$$\frac{I_{abs}}{I_{rad}} = \frac{I_2}{I_1} \sim 0.405 \frac{L_{cav}}{\lambda_{par}} \times \alpha^2 \sqrt{1 + \alpha^2} \times \sqrt{\frac{2U}{511}}. \quad (5)$$

Эта оценка, а также хорошо согласующееся с ней моделирование на основе системы уравнений (3-4) нестационарного одномодового гиротрона, модифицированной для случая двух пучков, показало, что недостатком

вышеописанного подхода при использовании протяженных резонаторов (характерно для терагерцового частотного диапазона) является большая величина тока пучка, которая требуется для обеспечения значительного увеличения стартового тока паразитных мод. Для улучшения этой ситуации было предложено использовать для поглощения паразитной волны не прямолинейный, а закрученный пучок, который сильнее взаимодействует с волной. Поглощение обеспечивается в том случае, если энергия дополнительного пучка слегка меньше энергии рабочего пучка. Приведены результаты моделирования двухпучкового гиротрона [19], показавшие перспективность такого подхода.

Глава 3 посвящена исследованию особенностей работы гиротронов с низкими энергиями электронных пучков и, следовательно, с низким уровнем выходной мощности излучения. Одним из наиболее важных приложений для таких приборов является динамическая поляризация ядер (ДПЯ) – способ значительного повышения чувствительности спектрометров ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

Параграф 3.1 посвящен исследованию возможности низковольтной работы непрерывного гиротрона на моде $TE_{5,2}$ на основном циклотронном резонансе, изначально спроектированного для работы на второй гармонике, на моде $TE_{6,5}$ на частоте 527 ГГц [20, 9a]. В п. 3.2.1 работа такого гиротрона была промоделирована на основе системы нестационарных одномодовых уравнений, описанных в первой главе. Моделирование было проведено как для правильной геометрии резонатора, так и для резонатора с небольшой конусностью, что позволяет учесть погрешность, которая была допущена при изготовлении резонатора. Это приближение может объяснить различие между моделированием и экспериментальными результатами. В моделировании было показано, что при рабочем напряжении 2 кВ при питч-факторе 1 мощность выходного излучения достигает 15 Вт при токе пучка 100 мА или выше, а для рабочего напряжения 1.5 кВ все еще возможна генерация излучения мощностью до 8 Вт. Устойчивая работа такого гиротрона на моде $TE_{5,2}$ на основном циклотронном резонансе на частоте 252 ГГц была экспериментально продемонстрирована для напряжений свыше 1.4 кВ. В диапазоне напряжений 1.6-2 кВ выходная мощность была оценена в несколько десятков мВт.

В п. 3.2.2 приведены результаты теоретического исследования и моделирования работы «гиротрино» [21, 6a] – слаборелятивистского гиротрона для ДПЯ/ЯМР приложений, совмещённого с ЯМР-спектрометром внутри одного криомагнита, что порождает несколько физических и инженерных проблем. Строгие требования к прибору, вызванные такой конфигурацией, приводят к некоторым нетипичным особенностям в проекте прибора: использование экстремально низкого рабочего напряжения, относительно короткого резонатора, вывод излучения в сторону катода (рис. 8), коллектор, расположенный в однородном магнитном поле. Исследование этих

проблем показывает, что в «гиротрино» может обеспечиваться уровень выходной мощности 10–20 Вт на частоте 265 ГГц при условии совпадения частот излучения и ДПЯ.

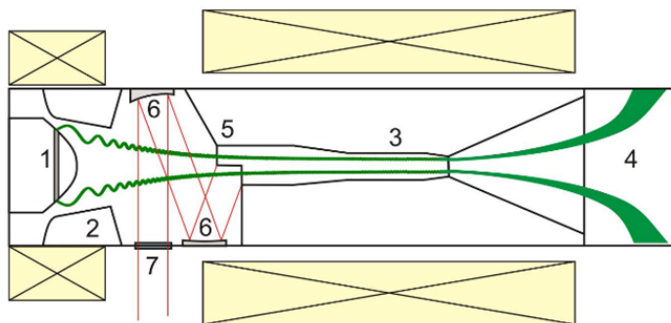


Рис. 8. Возможная схема гиротрона с выводом излучения в сторону катодного конца. 1 – катод, 2 – анод, 3 – резонатор, 4 – коллектор, 5 – волновой преобразователь, 6 – зеркала квазиоптического модового конвертера, 7 – выходное окно.

Параграф 3.3 посвящен исследованию особенностей перестройки частоты в гиротроне с выводом излучения в сторону катодного конца резонатора. Для такой гиротронной конфигурации на примере «гиротрино» было проведено исследование режимов эффективного возбуждения нескольких мод с высокими продольными индексами. При использовании достаточно протяженного резонатора рабочий ток становится значительно выше оптимального значения для работы на низшей аксиальной моде и достаточным для возбуждения мод с высоким продольным индексом. Было показано, что в данной системе аксиальные моды могут возбуждаться при магнитных полях как ниже, так и выше резонансного значения, в режиме лампы бегущей волны (гирос-ЛБВ) и гирос-ЛОВ соответственно [8а]. Для выбранной длины резонатора выходная мощность при работе на высокой аксиальной моде значительно выше, чем на низшей. Показано, что использование обращенного вывода энергии, минимизирующее влияние отражения встречной волны, может быть способом получения более гладкой зависимости мощности от частоты. Моделирование на основе усредненных уравнений одномодового нестационарного гиротрона, проверенное прямым трехмерным PIC-моделированием, показывает, что в гиротроне с напряжением 2 кВ и током 150 мА выходная мощность излучения может составлять от 15 до 30 Вт с КПД 5-10 % в полосе шириной 3 ГГц, причем перепад выходной мощности во всей полосе составляет менее двух раз (рис. 9). Возможность эффективной работы на высоких продольных модах может быть использована для непрерывной перестройки частоты в гиросприборах средней мощности.

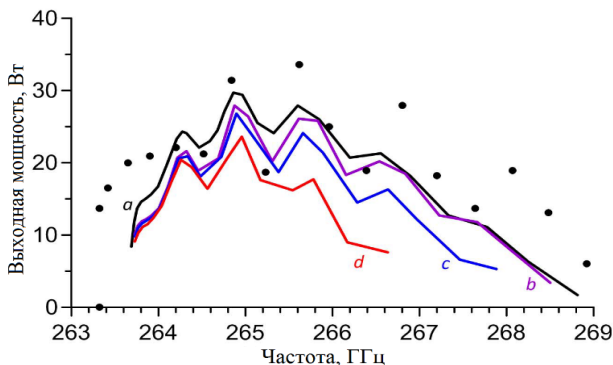


Рис. 9. Зависимость мощности от частоты для гиротрона с выводом излучения в сторону катода при разбросе по поперечным скоростям 0% (a), 5% (b), 20% (c), 35% (d). Точки соответствуют результатам PIC моделированием (разброс по скоростям 20%).

Параграф 3.4 посвящен исследованию устойчивости возбуждения высоких продольных мод в режиме лампы бегущей волны в гиротронах с низким ускоряющим напряжением. Частичное решение проблемы реализации гиротрона с рабочей волной, возбуждаемой электронным пучком с низким током, обладающей относительно низкой дифракционной добротностью — переход от работы на низшей продольной моде к работе на моде с более высоким аксиальным индексом (рис. 10). В п. 3.4.1 рассмотрен спектр продольных мод гиротронного резонатора, проанализированы условия их возбуждения. В обычных условиях генерация на второй (или выше) продольной моде в режиме ЛБВ нестабильна из-за возбуждения низшей продольной моды. Однако данная ситуация меняется, когда гиротрон работает при малом ускоряющем напряжении и когда в приборе используется достаточно протяженный резонатор. При малых напряжениях и, таким образом, низких скоростях электронов доплеровская поправка в условии синхронизма становится малой. В этой ситуации условие резонанса для высоких аксиальных мод практически переходит к гиротронному, и высшая аксиальная мода, возбуждающаяся в режиме ЛБВ, может успешно конкурировать с низшей близкой к отсечке модой.

В п. 3.4.2 приведено сравнение низковольтного гиротрона (параметры «гиротрино») с ускоряющим напряжением 2 кВ и с напряжением 30 кВ, разница между исследуемыми приборами была только в ускоряющих напряжениях. В первом случае стабильная работа на второй продольной моде возможна в достаточно широком диапазоне параметров и при рабочем токе, значительно превышающем минимальный стартовый. При ускоряющем напряжении 30 кВ устойчивое возбуждение второй продольной моды в режиме ЛБВ возможно только в очень ограниченной области параметров, рабочий ток должен быть крайне близок к стартовому

В п. 3.4.3 показано, что переход к работе гиротрона на высоких продольных модах, возбуждаемых в режиме ЛБВ, позволяет получить больший электронный и волновой КПД в низковольтных коротковолновых гиротронах с протяженными резонаторами из-за более сильного электронно-волнового взаимодействия и меньших омических потерь (рис. 11).

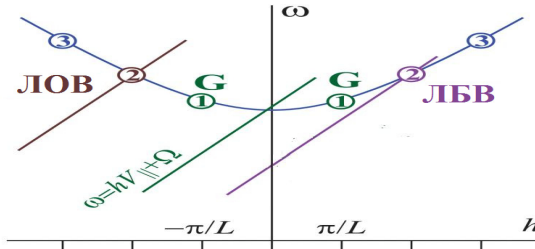


Рис. 10. Дисперсионная диаграмма, иллюстрирующая возбуждение низшей аксиальной моды в гиротронном режиме (G) и более высоких мод в режиме ЛОВ и ЛБВ.

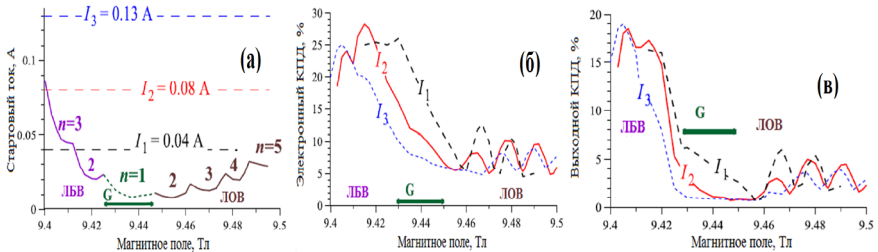


Рис. 11. Зависимость стартового тока от величины магнитного поля для гиротронного (G) режима возбуждения низшей ($n = 1$) моды и для высших ($n > 1$) мод, возбуждаемых в режиме ЛОВ и ЛБВ (а). Зависимость электронного (б) и выходного (в) КПД от магнитного поля при разных рабочих токах.

Глава 4 посвящена развитию уже давно обсуждающейся в электронике СВЧ идее многоволновых режимов [22-25] и, в частности, исследованию возможностей реализации таких режимов в коротковолновых гиротронах [12а, 13а, 33а-35а]. В **параграфе 4.1** исследуется метод получения мощных импульсов, основанный на компрессии двухволнового сигнала, генерируемого гиротроном при определённых условиях. При магнитных полях, меньших, далеких от резонансного для низшей продольной моды резонатора, но близких к резонансному для второй продольной моды, процесс возбуждения характеризуется последовательным возбуждением этих двух мод, обладающих разными частотами и, следовательно, разными групповыми скоростями. Такой режим возбуждения описан в п. 4.1.1. Возможность реализации этого двухволнового режима исследовалась на примере экспериментально реализованного в ИПФ РАН импульсного гиротрона с частотой 0,67 ТГц [10]. Данный гиротрон работал на моде $TE_{31,8}$, возбуждаемой на

основном циклотронном резонансе. В квазистационарном длинноимпульсном (10–20 мс) режиме мощность излучения составляла 200 кВт при токе пучка 15 А, что соответствовало КПД 20%. В соответствии с результатами моделирования двухволновой компрессирующий режим в этом гиротроне может быть реализован при удвоенном рабочем токе, что соответствует мощности пучка около 2 МВт. Эти возбуждающиеся последовательно продольные моды имеют слегка разные частоты и, следовательно, разные групповые скорости.

В п. 4.1.2 показано, что использованием выходной секции, обеспечивающей подходящую частотную дисперсию групповой скорости, можно обеспечить сложение двухволнового сигнала в один, обладающий большой пиковой мощностью, достигающей или даже превышающей мощность рабочего электронного потока [13а].

В п. 4.1.3 показано, что мощная импульсная генерация в режиме кооперации двух мод в гиротронах может быть реализована без использования дополнительных секций при условии вывода излучения в сторону катода и достаточно высоких рабочих токах [34а]. В этом случае возбуждающаяся сначала вторая продольная мода поступает на катодный выходной конец резонатора только после ее отражения от закритического сужения на коллекторном конце. В то же время низшая продольная мода, которая возбуждается позже, приходит в выходную секцию резонатора с меньшей групповой скоростью. В результате две волны, возбуждаемые в разное время переходного процесса возбуждения, образуют один мощный ВЧ-импульс (рис. 12).

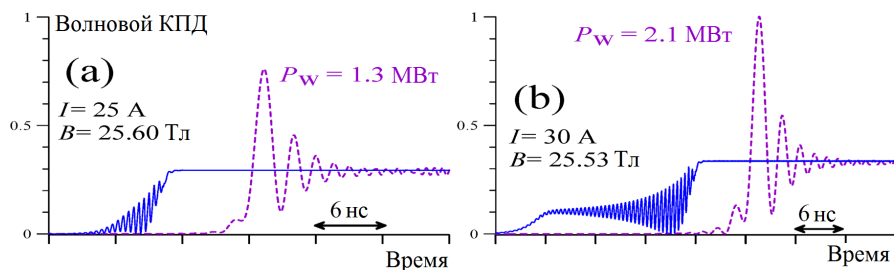


Рис. 12. Зависимость мгновенного волнового КПД (отношения мощности волны к мощности электронного пучка) от времени на выходе из резонатора (сплошные линии) и после оптимизированной компрессирующей секции (пунктирные линии) при рабочих токах 25 А (а) и 30 А (б). Рабочее магнитное поле оптимизировано для достижения наибольшей пиковой мощности импульса. Электронный пучок включается «мгновенно» (при $t = 0$).

Параграф 4.2 посвящен исследованию способа уменьшения добротности квазикритической рабочей волны за счет ее связи с бегущей волной. В п. 4.2.1 приведены условия связи двух волн, возбуждаемых на разных цик-

лотронных гармониках, на электронном пучке [22, 12a]. Связь между этими двумя волнами возможна в том случае, когда в любом сечении электронного пучка все частицы имеют одинаковые гирофазы. Обычно высокочастотные гироприборы обладают электронно-оптическими системами с высокой компрессией пучка магнитным полем, когда поле в прикатодной области значительно меньше поля в рабочем резонаторе. В этих системах электроны получают их вращательную скорость в прикатодной области. В рабочем резонаторе частицы такого пучка перемешаны по гирофазам, так что в данном случае режим циклотронной связи между двумя разными волнами невозможен. Путь решения этой проблемы заключается в использовании специальных экранов в области, близкой ко входу в рабочий резонатор. Эти экраны должны «вырезать» некоторые фракции электронного пучка, которые содержат частицы с одинаковыми фазами вращения. В этом случае значительная часть пучка теряется на экранах. Однако предполагается, что эта потеря должна компенсироваться увеличением КПД при работе в режиме связи двух мод на «гофрированном» электронном пучке.

В п. 4.2.2 получены уравнения, описывающие взаимодействие приосевого электронного пучка с двумя волнами на одной частоте и на разных гармониках. На основе этих уравнений для параметров слаборелятивистского (80 кВ, 0.7 А, питч-фактор 1.4) терагерцового гиротрона с большой орбитой на третьей гармонике было проведено моделирование двухволнового режима работы.

В п. 4.2.3 приведены результаты этого моделирования.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен механизм возбуждения относительно высоких продольных мод в гиротронном режиме, основанный на использовании резонаторов с периодическими фазовыми корректорами. Такой подход перспективен для использования в гиротронах со слабым электронно-волновым взаимодействием, обусловленным низкими рабочими токами и/или работой на высоких циклотронных гармониках, как метод повышения мощности генератора за счет существенного снижения омических потерь.

2. Предложены новые схемы гиротронных резонаторов с короткими селективирующими элементами, использование которых позволяет существенно улучшить селективность возбуждения пространственно развитых поперечных мод на высоких циклотронных гармониках.

3. Теоретически продемонстрирована возможность работы гиротрона при экстремально низких напряжениях 1,5-2 кВ с относительно высокими уровнями КПД и выходной мощности. Результаты численных расчетов подтверждены в эксперименте.

4. Для гиротронов с относительно низкими ускоряющими напряжениями рабочих электронных пучков продемонстрирована возможность достижения устойчивой и высокоэффективной генерации при возбуждении высоких продольных мод в режиме взаимодействия электронов с попутной бегущей компонентой стоячей резонаторной волны. Такие режимы могут использоваться в качестве пути повышения мощности генерации в гиротронах с протяженными резонаторами за счет существенного снижения доли омических потерь при относительно высоких уровнях электронного КПД.

5. Показано, что в низковольтных гиротронах с выводом излучения в сторону катодного конца возможна эффективная и плавная перестройка частоты генерации за счет перехода к работе на высоких продольных модах в режиме лампы обратной волны.

6. Предложено использование сложных режимов возбуждения гиротронов, характеризующихся сменой генерируемой моды в течение переходного процесса, для обеспечения компрессии двухчастотного выходного сигнала. Показано, что пиковая мощность СВЧ импульсов, формирующихся в результате такой компрессии, может превышать мощность рабочего электронного пучка гиротрона.

7. Предложен и исследован режим работы гиротрона на высокой циклотронной гармонике, в котором эффективный вывод излучения осуществляется далекой от отсечки бегущей волной за счет связи этой волны на электронном пучке с рабочей квазикритической волной гиротрона.

Список цитированной литературы

1. Granucci G. et al. Conceptual design of the EU DEMO EC-system: main developments and R&D achievements // Nucl. Fusion. 2017. Vol. 57, № 11. P. 116009.
2. Nusinovich G.S., Sprangle P., Semenov V.E., Dorozhkina D.S., Glyavin M. Yu. On the sensitivity of terahertz gyrotron based systems for remote detection of concealed radioactive materials // J. Appl. Phys. 2012. 111, 124912.
3. Nanni E.A. et al. Terahertz-driven linear electron acceleration // Nat. Commun. 2015. 6, 8486.
4. Weightman P. Prospects for the study of biological systems with high power sources of terahertz radiation // Phys. Biol. 2012. Vol. 9, № 5. P. 053001.
5. Rosay M., Blank M., Engelke F. Instrumentation for solid-state dynamic nuclear polarization with magic angle spinning NMR // J. Magn. Reson. Elsevier Inc. 2016. 264. P. 88–98.
6. Flyagin V.A., Gaponov A.V., Petelin M.I., Yulpatov V.K. The Gyrotron // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1977. Vol. 25, № 6. P. 514–521.
7. Гиротрон. Сборник статей под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
8. G. S. Nusinovich, Introduction to the Physics of Gyrotrons // Baltimore, MD, USA: The Johns Hopkins Univ. Press, 2004.
9. Denisov G.G. Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion // Nucl. Fusion. 2008. 48 (5). PP. 54007.
10. Glyavin M.Y., Luchinin A.G., Nusinovich G.S., Rodgers J., Kashyn D.G., Romero-Talamas C.A., Pu R. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // Appl. Phys. Lett. 2012. 101, 153503.
11. Rao S.L. et al. Electron Cyclotron Power Source System For ITER // Fusion Sci. Technol. 2014. 65 (1). P. 129–144.
12. Glyavin M.Y., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // Phys. Rev. Lett. 2008. 100 (1), Art. no. 015101.
13. Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range // Phys. Rev. Lett. 2009. 102, no. 24, p. 245101.
14. Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // Int. J. Electron. 1986. 61 (6), pp. 881–894.
15. Bratman V.L. et al. Common properties of free electron lasers // Optics Communications. 1979. 30(3), с. 409-412.
16. Самарский А.А. Теория разностных схем // М., Наука, 1977.
17. Зайцев Н.И. и др. Десятимегаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. вузов. Радиофизика. 2003, т.46, № 10, с. 914-918.

18. Запевалов В.Е., Цимринг Ш.Е. Многопучковые гиротроны // Изв. вузов. Радиофизика. 1990, т. 33. № 12, с. 1406.
19. Glyavin M.Y. et al. Development of THz Gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and Their Applications in Physical Research and High-Power THz Technologies // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. 5 (5), art. № 7137680, pp. 788-797.
20. Glyavin M.Yu. Denisov G.G., Zapevalov V.E., Koshelev M.A., Tretyakov M.Yu., Tsvetkov A.I. High power terahertz sources for spectroscopy and material diagnostic // Phys.-Usp. 2016, 59, 595.
21. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K., Makhlov P.B., Samoson A. THz gyrotron and BWO designed for operation in DNP-NMR spectrometer magnet // J. Infr., Millim., THz Waves. 2013. 34 (12), pp. 837-846.
22. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kolganov N.G., Samsonov S.V., Savilov A.V. Effective Co-Generation of Opposite and Forward Waves in Cyclotron-Resonance Masers // Phys. Rev. Lett. 2000. 85, p. 3424-3427.
23. Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые генераторы и их возможные применения // УФН. 2006. 176 (10), с. 1124-1130.
24. Александров А.Ф. и др. Релятивистский доплеровский множитель частоты на циклотронном резонансе // Радиотехника и электроника. 1982, т. 27, №3, с. 578.
25. Александров А.Ф. и др. Релятивистские доплеровские СВЧ множители частоты // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 3. Горький: ИПФ АН СССР, 1983.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1а. Bandurkin I.V., Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Savilov A.V. Gyrotron with a sectioned cavity based on excitation of a far-from-cutoff operating mode // Physics of Plasmas, 23, 013113 (2016).
- 2а. Kalynov Yu. K., Osharin I.V., Savilov A.V. A method for suppression of spurious fundamental-harmonic waves in gyrotrons operating at the second cyclotron harmonic // Physics of Plasmas 23, 053116 (2016).
- 3а. Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Savilov A.V., Zavolsky N.A., Relativistic second-harmonic gyrotron with a selective quasi-regular cavity // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 63, no. 12 (2016).
- 4а. Бандуркин И.В., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Калынов Ю.К., Ошарин И.В., Савилов А.В. Использование квазирегулярных резонаторов с короткими фазовыми корректорами в гиротронах, работающих на высоких циклотронных гармониках // Известия вузов. Радиофизика, 2016, т. 54, № 8-9, с. 729-742.
- 5а. Bandurkin I.V., Kalynov Yu.K., Makhlov P.B., Osharin I.V., Savilov A.V., Zheleznov I.V. Simulations of Sectioned Cavity for High-Harmonic Gyrotron // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 1 (2017).

6a. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K., Makhalov P.B., Osharin I.V. Numerical Study of a Low-Voltage Gyrotron (“Gyrotrino”) for DNP/NMR Spectroscopy // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 4 (2017).

7a. Bandurkin I.V., Glyavin M.Yu., Kuzikov S.V., Makhalov P.B., Osharin I.V., Savilov A.V. Method of Providing the High Cyclotron Harmonic Operation Selectivity in a Gyrotron With a Spatially Developed Operating Mode // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 9 (2017).

8a. Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Savilov A.V., Stability of excitation of travelling waves in gyrotrons with low-relativistic electron beams // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 11 (2017).

9a. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Zavolsky N.A., Smooth Wideband Frequency Tuning in Low-Voltage Gyrotron With Cathode-End Power Output // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 12 (2017).

10a. Bratman V.L., Fedotov A.E., Fokin A.P., Glyavin M. Yu., Manuilov V.N., Osharin I.V., Operation of a sub-terahertz CW gyrotron with an extremely low voltage // Physics of Plasmas, 24, 113105 (2017).

11a. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Savilov A.V. Terahertz Large-Orbit High-Harmonic Gyrotrons at IAP RAS: Recent Experiments and New Designs // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 65, no. 6 (2018).

12a. Savilov A.V., Denisov G.G., Kalynov Yu.K., Osharin I.V. Two-wave regime of operation of the high-harmonic gyrotron // Physics of Plasmas, vol. 22, 043104 (2015).

13a. Glyavin M.Yu., Osharin I.V., Savilov A.V. To the feasibility of a pulsed gyrotron with a peak rf power exceeding the power of the operating electron beam // Applied Physics Letters, 111, 073504 (2017).

14a. Бандуркин И.В., Братман В.Л., Калынов Ю.К., Опарина Ю.С., Ошарин И.В., Завольский Н.А., Савилов А.В. Терагерцевые гиротроны на высоких циклотронных гармониках с нерегулярными электродинамическими системами // Известия РАН. Серия физическая, 2018, т. 82, № 12, с. 1748–1753.

15a. Братман В.Л., Калынов Ю.К., Кулагин О.П., Леонтьев А.Н., Махалов П.Б., Мануилов В.Н., Ошарин И.В., Савилов А.В., Федотов А.Э., Фокин А.П., Чирков А.В. Компактный источник ТГц-излучения для повышения чувствительности ядерного магнитного резонанса путем динамической поляризации ядер // Известия РАН. Серия физическая, 2018, т. 82, № 12, с. 1760–1765.

16a. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Yu.L., Osharin I.V., Savilov A.V. High-Harmonic Large Orbit Gyrotrons in IAP RAS // Proceedings of 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Hong Kong, China, 23-28 August, 2015, 7327466.

17a. Savilov A.V., Bandurkin I.V., Kalynov Yu.K., Osharin I.V., High-Harmonic Terahertz Gyrotrons Based On The Use Of Quasi-Regular Cavities

With Short Wave Phase Correctors // Proceedings of 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, Copenhagen, Denmark, 25-30 September, 2016, 7758506.

18а. Ошарин И.В., Бандуркин И.В., Калынов Ю.К., Савилов А.В., Гиротроны на высоких гармониках с квазирегулярными резонаторами // труды 26-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2016, с. 1695-1701.

19а. Бандуркин И.В., Калынов Ю.К., Ошарин И.В., Савилов А.В. Гиротрон, основанный на возбуждении бегущей волны в резонаторе с фазовыми корректорами // Труды всероссийской конференции «X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн». Н. Новгород, 26 февраля - 3 марта, 2016, с. 55.

20а. Ошарин И.В., Завольский Н.А., Калынов Ю.К., Савилов А.В. Использование квазирегулярных резонаторов с короткими неоднородностями для повышения селективности гиротронов, работающих на второй циклотронной гармонике // труды всероссийской конференции «X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн». Н. Новгород, 26 февраля - 3 марта, 2016, с. 76-77.

21а. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Калынов Ю.К., Ошарин И.В., Савилов А.В. Гиротрон на второй гармонике гирочастоты с селекцией рабочей моды с помощью фазового корректора // труды 23-й научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», 21-28 сентября, Судак, 2016.

22а. Ошарин И.В., Савилов А.В., Калынов Ю.К., Кулагин И.С., Иляков Е.В. Релятивистский гиротрон на второй циклотронной гармонике с квазирегулярным резонатором // труды XVII Всероссийской школы-семинара «Волны-2017», Можайск, 4 – 9 июня, 2017.

23а. Osharin I.V., Bandurkin I.V., Kalynov Yu.K., Savilov A.V. Terahertz gyrotrons with quasi-regular cavities // Proceedings of XXXII International Union of Radio Science General Assembly & Scientific Symposium, Montreal, Canada, 19 – 26 August, 2017, pp. 1-3.

24а. Osharin I.V., Bandurkin I.V., Kalynov Yu.K., Kuzikov S.V., Savilov A.V. Terahertz gyrotrons with quasi-regular cavities // Proceedings of 10th Int. Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications» EPJ Web Conf., vol. 149. Nizhny Novgorod–Moscow, Russia, Jul. 2017, no. 05018.

25а. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Savilov A.V. Terahertz large-orbit high-harmonic gyrotrons at IAP RAS: recent experiments and new designs // Proceedings of IVEC 2017 – 18th International Vacuum Electronics Conference, London, UK, 2 – 26 April, 2017.

26а. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Savilov A.V., Zavolsky N.A. Efficient excitation of high axial modes in simulations of low-voltage gyrotron // Proceedings of IVEC 2017 – 18th International Vacuum Electronics Conference, London, UK, 2 – 26 April, 2017.

27a. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N., Osharin I.V. Progress in the development of low-voltage gyrotron for integration with NMR spectrometer // Proceedings of 10th Int. Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications» EPJ Web Conf., vol. 149. Nizhny Novgorod – Moscow, Russia, Jul. 2017, 04039.

28a. Fedotov A.E., Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Makhalov P.B., Manuilov V.N., Osharin I.V., Savilov A.V. Low-voltage Gyrotron For DNP Applications: Project And Features // Proceedings of 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Cancun, Mexico, 27 August – 1 September, 2017, 8067061.

29a. Manuilov V.N., Fokin A.P., Zaslavsky V.Yu., Zotova I.V., Osharin I.V., Savilov A.V., Idehara T., Glyavin M.Yu. Possibilities of Mode Selection in Double-Beam Gyrotrons with Additional Absorbing Beam // Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Nagoya, Japan, 9 – 14 September, 2018, 8509976.

30a. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N., Osharin I.V., Savilov A.V., Zavolsky N.A. Terahertz Large-Orbit High-Harmonic Gyrotrons at IAP RAS Features // Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Nagoya, Japan, 9 – 14 September, 2018, 8509883.

31a. Osharin I.V., Savilov A.V. Generation of powerful pulses in a gyrotron with radiation output in the direction of the cathode end // Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Nagoya, Japan, 9 – 14 September, 2018, 8510007.

32a. Bandurkin I.V., Kalynov Yu.K., Zavolsky N.A., Oparina Yu.S., Osharin I.V., Savilov A.V. High-harmonic-gyrotron cavities with short irregularities // Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Nagoya, Japan, 9 – 14 September, 2018, 8510309.

33a. Зуев А.С., Ошарин И.В. Особенности работы гиротронов с обращенным выводом энергии // Сборник статей VII Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2018, с. 696-698.

34a. Ошарин И.В., Савилов А.В. Мощная импульсная генерация в гиротронах в режиме кооперации двух мод // Труды 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2017, с. 1135-1141.

35a. Ошарин И.В., Калынов Ю.К., Савилов А.В. Двухволновой режим работы гиротрона на высоких гармониках // Труды XV Всероссийской школы-семинара «Волны-2015». Можайск, 2015.

Ошарин Иван Владимирович

**СЕЛЕКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ
ВЫСОКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИК
И ВЫСОКИХ ПРОДОЛЬНЫХ МОД
В ГИРОПРИБОРАХ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

Автореферат

Подписано к печати 20.06.2019.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 50 (2019).

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