

Федеральное агентство научных организаций
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»

На правах рукописи

Седов Антон Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЦЕЛЯХ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ
ТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

01.04.03 радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н. Запевалов В.Е.

Нижний Новгород

2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| ГЛАВА 1 УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ГИРОТРОНА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ..... | 19 |
| 1.1 Обзор истории освоения субтерагерцового и терагерцового диапазонов гиротронами и современное состояние исследований. Расчетные модели, используемые для анализа электронно-волнового взаимодействия в гиротронах..... | 19 |
| 1.2 Анализ электронно-волнового взаимодействия в непрерывных суб-ТГц гиротронах .. | 34 |
| Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ | 59 |
| 2.1 Оптимизация гиротрона для работы в режимах с малым ускоряющим напряжением.. | 60 |
| 2.2 Возможности плавной перестройки частоты в гиротронах суб-ТГц диапазона частот | 73 |
| 2.3 Развитие методов повышения селективности рабочего типа колебаний в гиротронах суб- ТГц и ТГц диапазона частот..... | 83 |
| Глава 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 0.258 ТГц НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ГИРОЧАСТОТЫ | 97 |
| 3.1 Особенности конструкции гиротрона и основные расчетные параметры | 99 |
| 3.2 Результаты экспериментального исследования непрерывного гиротрона на второй гармонике гирочастоты | 112 |
| 3.3 Анализ полученных экспериментальных данных..... | 121 |
| Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 0.263 ТГц НА ПЕРВОЙ ГАРМОНИКЕ ГИРОЧАСТОТЫ | 128 |
| 4.1 Требования к гиротрону и его конструктивные особенности. Оценка параметров электронного пучка и оптимизация электронно-волнового взаимодействия | 129 |
| 4.2 Экспериментальное исследование гиротрона и анализ полученных данных..... | 140 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 148 |
| СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ | 152 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 161 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одной из актуальных задач современной радиофизики является повышения рабочей частоты электронных приборов и освоение ими субтерагерцового и терагерцового диапазона. Перспективным видом приборов в данном диапазоне являются мазеры на циклотронном резонансе – устройства, основанные на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле¹. Наиболее известным и широко распространенным вариантом МЦР является гиротрон, основными особенностями которого является использование адиабатической магнетронно-инжекторной пушки с сильной компрессией электронного потока и открытого высокоселективного резонатора с дифракционным выводом энергии.

Основными подсистемами гиротрона являются: электронно-оптическая система, формирующая винтовой электронный пучок с высокой долей вращательной энергии и малым разбросом скоростей; электродинамическая система, в которой происходит взаимодействие пучка с одной из собственных мод; коллектор электронного пучка; система вывода, включающую согласованное выходное окно и во многих случаях квазиоптический преобразователь рабочей моды в узконаправленный волновой пучок² (Рисунок В1). Для работы гиротрона необходима магнитная система, (обычно в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне это криомагниты или импульсные магниты), создающая магнитное поле для формирования электронного потока и обеспечения резонансного взаимодействия электронов с высокочастотным полем.

¹Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1967, Т.10, №9–10, С.1414-1453.

² Запевалов В.Е. Эволюция гиротронов. // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2011, Т.54, №8–9, С.553–572.

Гиротрон является автогенератором, в котором энергия вращения электронов в сильном магнитном поле переходит в ВЧ излучение, в условиях гирорезонанса.

$$\omega \approx n\omega_h + hv_{\parallel}, \quad (B1)$$

где ω_h и v_{\parallel} - циклотронная частота (гирочастота) и дрейфовая скорость электронов, n -номер циклотронной гармоники, h -продольное волновое число. Взаимодействие электронного пучка с одной из собственных мод круглого волновода происходит около частоты отсечки³⁴ ($h \approx 0$). Поскольку взаимодействие электронного пучка происходит с быстрой волной, распространяющейся практически поперек поступательного движения электронов, отсутствует необходимость в мелкомасштабных элементах замедляющих систем, принципиально необходимых для классических приборов вакуумной электроники, и обеспечивается слабая чувствительность к скоростному разбросу.

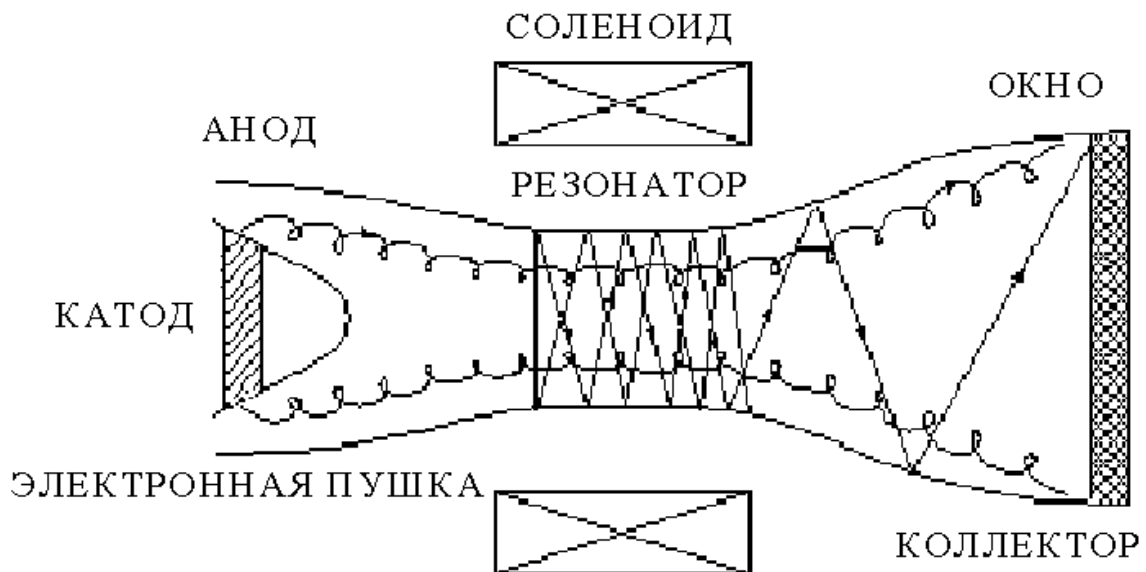


Рисунок В1. Общая схема гиротрона

³Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Goldenberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K. The gyrotron: high-power source of millimeter and submillimeter waves // Infrared Phys., 1978 V. 18, № 6, P.385-393.

⁴ Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons //The Johns Hopkins University press Baltimore-London, 2004.

В результате многолетних исследований в гиротронах реализованы высокие значения КПД (до 70% в системах с одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов⁵) и мощность (2 МВт на частоте 0.17 ТГц⁶ и 0.2 МВт на частоте 0.67 ТГц⁷). Таким образом, мощность излучения (и эффективность) гиротронов на несколько порядков превосходят мощности твердотельных генераторов⁸ и классических приборов вакуумной электроники (ЛОВ, оротроны и клинотроны⁹), а размеры, рабочие напряжения и стоимость значительно ниже, чем в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ)¹⁰. Гиротроны и их модификации (гироклистроны, гиро-ЛОВ, гиро-ЛБВ) успешно используются для задач электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦРН), стабилизации и активной диагностики плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), создания мощных систем радиолокации миллиметрового диапазона длин волн, высокотемпературной обработки материалов, диагностики различных сред и других приложений¹¹.

⁵ *M.V.Morozkin, M.Yu.Glyavin, G.G.Denisov, A.G.Luchinin* A high-efficiency second harmonic gyrotron with a depressed collector // *Int. J. IRMM Waves*, 2008, 29, 11, p. 1004.

⁶ *Denisov G.G., Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E.* Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion // *Nuclear Fusion*, 2008, 48, 1, 054007:1-5.

⁷ *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Nusinovich G.S. et al.* A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101, 153503:1-4.

⁸ *Негирев А.А.* Широкополосные ЛОВ, непрерывно перекрывающие миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн // *Вакуумная СВЧ электроника*, ред. М.И.Петелин, Н.Новгород, 2002, С.93.

⁹ *Лысенко Е.Е., Паньков С.В., Пишко О.Ф., Чумак В.Г., Чурилова С.А.* Разработка клинотронов непрерывного действия для диапазона 400...500 ГГц // *Электромагнитные волны и электромагнитные системы*, 2010, Т.15, №112, Р.63-71.

¹⁰ *Bratman V.L., Dumesh B.S., Fedotov A.E. et al.* Terahertz Orotrons and Oromultipliers *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, 38 1466 *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, 38 P.1466-1471.

¹¹ *Заневалов В.Е.* Эволюция гиротронов. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, 2011, Т.54, № 8–9, С.553–572.

Одним из недостатков, ограничивающим область применения гиротронов, является сравнительно небольшая полоса перестройки частоты, обусловленная высокой добротностью резонаторов Q (как правило, $Q \sim 1000$). Ряд подходов, позволяющих отчасти решить эту проблему, рассмотрен в диссертации.

Долгое время основными задачами, стоявшими перед разработчиками и исследователями гиротронов, были повышение частоты, КПД, мощности и длительности импульса излучения. С развитием новых приложений к вышеперечисленным задачам добавились следующие требования: высокая стабильность частоты и мощности, расширение полосы плавной перестройки частоты, увеличение срока службы прибора, простота и удобство работы персонала при использовании гиротронных комплексов.

В настоящее время все больше внимание уделяется освоению гиротронами терагерцового диапазона частот (0.1–10 ТГц)¹². Терагерцовые волны перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, включая развитие методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения¹³. Мощное терагерцовое излучение может быть использовано для создания плотной плазмы и управления её параметрами (управляемый термоядерный синтез, "точечные" плазменные источники рентгеновского излучения, дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения)¹⁴.

Первые эксперименты по генерации ТГц излучения гироприборами были проведены сотрудниками НИРФИ в 1970-80-х гг.: созданы непрерывный гиротрон

¹² *Gavrilov N.G., Knyazev B.A., Kolobanov E.I. et al.* Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2007, 575(1-2):4.

¹³ *Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В.* Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения // УФН, 2011, №181, С. 867–874.

¹⁴ *Nusinovich G.S., Pu R., Antonsen T.M., Jr. et al.* Development of THz-range gyrotrons for detection of concealed radioactive materials // Int. J. IRMM&THz Waves, 2011, 32, 380-402

с частотой 0.315 ТГц и рекордной для того времени мощностью 1.6 кВт¹⁵ и непрерывный гиротрон с рабочими частотами 0.25 ТГц и 0.28 ТГц¹⁶. После первых успехов интенсивность работ по данному направлению снизилась, поскольку на первый план выдвинулась задача создания мегаваттных источников для электронно-циклотронного нагрева плазмы и управления током в установках УТС. В начале 2000-х работы по освоению ТГц диапазона получили новый импульс, инициированный ростом числа перспективных приложений, в частности спектроскопией высокого разрешения. В настоящее время работы по созданию терагерцовых гиротронов ведутся в ряде мировых ведущих научных центров, занимающихся вакуумной электроникой.

Зарубежные разработки терагерцовых гиротронов и их приложений ведутся в основном в исследовательском центре по изучению дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, Фукуи, Япония)¹⁷; Массачусетском Технологическом Институте (MIT, США)¹⁸, Университете Мэриленда (UMD)¹⁹, научно-исследовательской компании CCR (Calabasas Creek Research, Inc., США)²⁰, Терагерцовом научном центре (THz RC, Ченду, Китай)²¹. Созданы коммерческие

¹⁵ *Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А.* Гиротроны диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн // Радиотехника и электроника, 1974, 19, 5, 1056-1060

¹⁶ *Панкратова Т.Б., Нусинович Г.С.* Экспериментальное исследование диагностического гиротрона // ЖТФ, 1989, Т.59, №8, С.110.

¹⁷ *Idehara T., Ogawa I., Mori H. et al.* A THz gyrotron FU CW III with a 20 T superconducting magnet // Proc. 33rd Int. Conf. Infrared, Millim. Terahertz Waves, Pasadena, CA, 2008

¹⁸ *Torrezan A.C., Shapiro M.A., Sirigiri J.R., Temkin R.J.* Operation of a Continuously Frequency-Tunable Second-Harmonic CW 330-GHz Gyrotron for Dynamic Nuclear Polarization // IEEE Trans. Elec. Dev., 2011, №58, P.2727-2783.

¹⁹ *Nusinovich G.S., Pu R., Antonsen Jr. T.M. et al.* // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2011. V. 32. №3. P.380.

²⁰ *Read M., Ives L., Neilson J, Nusinovich G.* Development of a High Power Pulse THz Gyrotron Int. Vacuum Electronics Conf., Kitakyushu, Japan, 2007.

²¹ *Fu W., Yan Y., Yan X., Yuan X., Liu S.* Generating 0.42 THz radiation from a second harmonic gyrotron // Chinese Science Bulletin, 2011, V.56, №33, P.3572-3574

фирмы (например, Bridge 12, США)²² и подразделение компании Bruker-Biospin (совместно с CPI, США)²³, основной деятельностью которых является создание гиротронов и гиротронных комплексов для спектроскопии высокого разрешения. В ИПФ РАН также в последние годы были достигнуты рекордные значения частоты и мощности (частота 1 ТГц при мощности 1,5 кВт) в импульсном режиме генерации²⁴, а также созданы непрерывные высокостабильные гиротроны на частотах около 0,26 ТГц²⁵.

В ходе освоения терагерцового диапазона приходится решать ряд новых физических и технических задач, связанных, прежде всего, с обеспечением эффективного селективного возбуждения рабочего типа колебаний при обеспечении на заданном потребителем уровне мощности и приемлемых тепловых нагрузок на конструктивных элементах прибора.

Повышение выходной частоты излучения требует соответствующего увеличения магнитного поля в пространстве взаимодействия, что приводит к существенному усложнению и удорожанию магнитной системы. Одним из возможных решений указанной проблемы представляется переход к работе на гармониках гирочастоты. При этом возникает сильная конкуренция со стороны мод резонатора, синхронных с низшими гармониками гирочастоты, так как их стартовые токи на порядок меньше, чем стартовые токи рабочих мод на высших гармониках. Таким образом, приходится использовать в качестве рабочих моды сравнительно низкого порядка. С уменьшением характерных поперечных размеров резонатора, определяемых длиной волны излучения (и смещением

²² Сайт компании Bridge 12: <http://www.bridge12.com/> (дата обращения: 2.02.2015).

²³ Описание спектроскопических комплексов на основе гиротронов на сайте компании Bruker: <http://www.bruker.com/products/mr/nmr/dnp-nmr/overview.html> (дата обращения: 2.02.2015).

²⁴ *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu.* Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100, 015101:1-4.

²⁵ *Bratman V.L., Glyavin M.Yu., Kalynov Yu.K. et al.* Terahertz Gyrotrons at IAP RAS: Status and New Designs // *Int. J. of Infrared, Millimeter and THz Waves*, 2011, V.32, №3, P.371-379.

максимума фактора возбуждения рабочей моды к оси системы), радиус электронного пучка в резонаторе соответственно также существенно уменьшается. Сочетание указанных факторов приводит к тому, что эффективная площадь поперечного сечения пучка и, соответственно, максимальная величина электронного тока, заметно снижается. Уменьшение объема используемого резонатора, а также увеличение частоты приводит и к существенному росту омических потерь в резонаторе - вплоть до уровня 80-90% от генерируемой мощности.

Таким образом, оптимизация высокочастотных гиротронов, являвшаяся одной из целей диссертационной работы, заключается, главным образом, в выборе параметров электродинамической системы и электронного пучка, при которой достигается высокий КПД и осуществляется эффективная селекция рабочей моды и подавление паразитных мод. Последнее особенно важно в гиротронах, работающих на гармониках гирочастоты. При этом селекция может осуществляться, как применением различных типов резонаторов (электродинамическая селекция), так и подбором параметров электронного пучка (электронная селекция), в частности, использованием приосевого электронного потока в так называемых гиротронах с большой орбитой²⁶.

Цели диссертации:

1. Изучение специфики процессов электронно-волнового взаимодействия в субмиллиметровых гиротронах как на теоретическом, так и на экспериментальном уровне.

2. Сравнение полученных экспериментальных и теоретических данных, выявление и изучение основных эффектов, важных для оптимизации и разработки будущих субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов.

3. Оптимизация параметров электродинамических систем субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов для достижения требуемого уровня КПД, мощности и

²⁶*Bratman V.L., Kalynov Yu.K. Manuilov V.N. Large-Orbit Gyrotron Operation in the Terahertz Frequency Range // Phys. Rev. Lett. 2009, 102, 245101*

частоты генерации, а также их высокой стабильности в долговременном непрерывном режиме работы.

4. Изучение способов подавления паразитной генерации мод на более низких гармониках в различных электродинамических системах для дальнейшего продвижения гиротронов в терагерцовый диапазон, а также с целью повышения КПД и мощности излучения при использовании более высоких рабочих токов.

5. Увеличение полосы перестройки частоты в субтерагерцовых и терагерцовых гиротронах при сохранении высокого уровня КПД.

Научная новизна диссертации состоит в том, что впервые в России были созданы высокостабильные гиротроны средней мощности терагерцового диапазона частот для перспективных научно-технических приложений. Были предложены новые электродинамические системы с повышенной селекцией для повышения рабочей частоты терагерцовых гиротронов.

Практическая значимость работы обусловлена ее направленностью на исследования процессов электронно-волнового взаимодействия в субтерагерцовых и терагерцовых гиротронах. Детальное изучение указанных процессов будет способствовать созданию нового поколения гироприборов с уникальными характеристиками для широкого спектра научных и технических приложений. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, могут быть использованы при дальнейших исследованиях, разработках, производстве и приложениях субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов, проводимых в различных научных учреждениях и научно-производственных предприятиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оптимизация слабонерегулярных цилиндрических резонаторов позволяет реализовать гиротроны на второй гармонике гирочастоты, работающие в диапазоне частот 0.2-0.8 ТГц с выходной мощностью в сотни ватт.

2. Применение цилиндрических резонаторов ступенчатого профиля позволяет реализовать в гиротронах одномодовую генерацию на частотах вплоть до 2 ТГц на второй циклотронной гармонике.

3. Согласованное изменение рабочего магнитного поля и температуры охлаждающей жидкости резонатора позволяет осуществить плавную перестройку частоты генерации в полосе, составляющей несколько десятых долей процента, при сохранении выходной мощности.

4. Использование электродинамической системы с выводом излучения навстречу электронному пучку увеличивает полосу плавной перестройки частоты гиротрона в полтора раза по сравнению с традиционными гиротронами.

5. В субтерагерцовых гиротронах с уровнем мощности сотни ватт, возможно достижение долговременной стабильности частоты на уровне $Df/f \sim 5 \cdot 10^{-6}$, достаточной для задач спектроскопии на основе динамической поляризации ядер с использованием ядерного магнитного резонанса.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах [A1-A14] и докладывались на Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Бусан, Корея 2009, Рим, Италия 2010), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н.Новгород 2010,2014; Карлсруэ, Германия 2011, 2013), Международных семинарах по мощным СВЧ-источникам и их приложениям, (Н. Новгород 2008, 2011, 2014,), Зимних школах-семинарах по электронике сверхвысоких частот и радиофизике (Саратов 2009, 2012, 2015), Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015), Харьковских конференциях молодых ученых (Харьков, Украина 2009, 2011, 2013), Международных Харьковских симпозиумах по физике и инженерии миллиметровых, субмиллиметровых и терагерцовых волн (Харьков, Украина 2010, 2013), Всероссийских семинарах по радиофизике миллиметровых и

субмиллиметровых волн (Н.Новгород 2009, 2011, 2013, 2016), Нижегородских сессиях молодых ученых (Н.Новгород 2008, 2009), Координационном научно-техническом семинаре по СВЧ-технике (Н.Новгород 2009), Научных конференциях ННГУ по радиофизике, (Н.Новгород, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014), Школах молодых ученых «Актуальные проблемы современной физики» (Звенигород 2010, 2012), Конкурсе молодых ученых ИПФ РАН (Н.Новгород 2011,2015), а также на семинарах по вакуумной электронике, проводимых в ИПФ РАН.

Личный вклад автора в проведенные исследования.

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1-A55], получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании электронно-волнового взаимодействия в gyroприборах, численном моделировании различных режимов генерации, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов и статей. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Большая часть численных расчетов выполнена автором диссертации лично. Экспериментальное исследование проводилось в составе группы ученых и инженеров, работавших на гиротронных комплексах. Обработка результатов экспериментов проводилась автором лично (гл.3) или при непосредственном участии автора (гл.4).

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

Краткое содержание. В первой главе исследованы режимы генерации ранее созданных и испытанных субтерагерцовых гиротронов. В п.1.1 дается краткий исторический обзор освоения субтерагерцового и терагерцового

диапазона гиротронами, описание основных современных результатов по данной тематике и сопоставление разработок, проводимых в ИПФ РАН с мировым уровнем. Описаны расчетные модели, используемые для анализа процессов электронно-волнового взаимодействия в гиротронах.

В п. 1.2 представлены результаты численного моделирования режимов генерации излучения в непрерывном гиротроне на второй гирогармонике с частотой 0,315 ТГц с рабочей модой $TE_{-2,3}$ (знак минус соответствует противоположным направлениям вращения электронов и электрической компоненты поля рабочей моды) и их сопоставление с результатами эксперимента. Определены соответствовавшие условиям эксперимента параметры электронного пучка: питч-фактор – отношение вращательной скорости электронов к скорости их поступательного движения вдоль оси симметрии системы и разброс вращательных скоростей электронов (1,5 и 0,3 соответственно).

Также в п.1.2 рассматривается непрерывный гиротрон средней мощности на основном циклотронном резонансе с рабочей модой $TE_{22,8}$ и частотой генерации 0,3 ТГц. В ходе экспериментов КПД данного гиротрона оказался ниже расчетного, а также наблюдались режимы двухчастотной генерации. Для объяснения данных эффектов было проведено моделирование, учитывающее влияние точности юстировок (несоосность траектории ведущих центров электронных орбит и оси резонатора) на выходные характеристики гиротрона.

В п.1.3. представлены результаты аналогичного исследования для гиротронов на второй гирогармонике с частотами 0,25 ТГц на рабочей моде TE_{65} и 0,28 ТГц на моде TE_{85} . При моделировании были учтены такие факторы, как неоптимальность радиуса ведущих центров электронного пучка, а также отражение выходного сигнала от окна гиротрона, что позволило с высокой точностью определить зоны генерации не только рабочей, но и соседних мод, как на первой, так и на второй гирогармониках. Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Найденные при анализе рассмотренных в п.1.2-1.3 гиротронов значения питч-факторов и разбросов

скоростей электронного пучка соответствуют результатам траекторного анализа магнетронно-инжекторных пушек (МИП)²⁷ и близки к данным, экспериментально полученным при близких значениях интенсивности магнитного поля в гиротронах диапазона 0,11-0,17 ТГц на первой гармонике гирочастоты²⁸. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует об адекватности введения эмпирического коэффициента (равного $\frac{1}{2}$) при определении проводимости стенок резонатора и последующем расчете омической добротности

Таким образом, исследование зон генерации как рабочей, так и паразитных мод в вышеперечисленных гиротронах и сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило выявить влияние на режимы генерации таких факторов, как отклонение ведущих центров электронных орбит от оптимального значения; несоосности электронного пучка и оси резонатора пространственный заряд электронного пучка; отражение волн от выходного окна. Полученные результаты актуальны для проектирования и оптимизации вновь разрабатываемых гиротронов.

Во **второй главе** обсуждаются вопросы теоретического исследования и численного моделирования новых субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов. В п.2.1 рассматриваются некоторые вопросы теории ТГц гиротронов с электродинамической системой в виде отрезка цилиндрического волновода круглого сечения с закритическим сужением и выходным расширением. Для актуального случая работы гиротрона при низких напряжениях, на плоскости параметр тока - омические потери построены линии изо-КПД для первых трех

²⁷ Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E. Numerical Simulation Models of Focussing Systems of Intense Gyrotron Helical electron Beams // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2001, V.22, №8, P.1119

²⁸ Glyavin M.Yu., Goldenberg A.L., Kuftin A.N., V.K.Lygin, A.S.Postnikova, Zapevalov V.E. Experimental studies of gyrotron electron beam systems // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1999, V.27, №2, P.474-483.

гармоник циклотронной частоты. Также получены оценки, позволяющие прогнозировать возбуждение паразитных мод в зоне генерации рабочей моды.

Далее приводятся результаты численного моделирования нескольких гиротронов в диапазоне 0,25-0,8 ТГц на различных гармониках гирочастоты. Показана возможность достижения выходной мощности порядка 100 Вт при относительно низких ускоряющих напряжениях (15-20 кВ) и рабочих токах электронного пучка (0.5 А) для гиротронов на второй гармонике гирочастоты. Выходной КПД при этом составляет несколько процентов, омические потери растут с повышением частоты и могут составлять до 90 % генерируемой мощности.

В п.2.2 обсуждаются возможности и способы увеличения полосы плавной перестройки частоты генерации гиротронов. Одним из них является возбуждение мод с большим числом продольных вариаций высокочастотного (ВЧ) поля. Для этого предлагается использовать слабо-конический резонатор с малым углом раскрыва, а для получения близких значений мощности на всех типах колебаний предлагается использовать согласованную перестройку, как магнитного поля, так и радиуса резонатора при помощи изменения его температуры, что можно обеспечить, например, управлением температуры охлаждающей резонатор воды.

Другим предложенным способом увеличения полосы перестройки является использование электродинамической системы с выводом выходного излучения в сторону катода. При этом структура поля в резонаторе становится более близкой к структуре гиро-ЛОВ²⁹, что позволяет добиться относительно плавной перестройки частоты при сохранении высокого уровня КПД.

В п.2.3 обсуждаются возможные варианты электродинамических систем гиротронов на гармониках гирочастоты с улучшенными селективными свойствами. В частности, рассматривается профиль резонатора,

²⁹ Samsonov S.V., Denisov G.G., Bratman V.L., Bogdashov A.A., Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Lygin V.K., Thumm M.K. Frequency-tunable CW Gyro-BWO with a helically rippled operating waveguide // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2004, V.32, №3, P.884-889.

представляющий собой аксиально-симметричную периодическую структуру с медленно меняющейся амплитудой, то есть, фактически, набор кольцевых канавок, глубина которых медленно меняется вдоль оси резонатора. При этом можно подобрать профиль огибающей таким образом, чтобы для рабочей моды на второй гармонике гирочастоты критическая частота не зависела от продольной координаты, в отличие от критической частоты паразитной моды.

Также в п.2.3 обсуждается проект гиротрона с частотой 2 ТГц, основанный на двухступенчатом резонаторе с трансформацией мод (со связанными модами). Реализация этого проекта предполагается в существующем импульсном соленоиде с индукцией магнитного поля до 50 Тл.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные теоретическим и экспериментальным исследованием непрерывного гиротрона на второй гирогармонике с рабочей частотой 0,258 ТГц и мощностью до 200 Вт для работы в составе гиротронного комплекса. Данный гиротрон создавался как источник микроволнового излучения в ЯМР спектроскопическом комплексе, ориентированном на исследование веществ с использованием процессов динамической поляризации ядер (ДПЯ) в Институте биофизической химии университета имени И.В Гете, г.Франкфурта на Майне (Германия).

В п.3.1 приведены основные результаты расчетов, выполненных при разработке прибора. В качестве рабочего типа колебаний была выбрана мода $TE_{-2,3}$. В процессе расчетов были определены оптимальные по КПД параметры резонатора. Одним из основных требований к данному гиротрону, обусловленному спецификой решаемой задачи, было поддержание высокой стабильности частоты и мощности излучения (10^{-5} и 10^{-1} , соответственно) в течение длительного (12 часов) времени работы в непрерывном режиме. Для оценки необходимой стабильности технических параметров было выполнено численное моделирование, демонстрирующее величину дрейфа мощности и частоты излучения при изменении индукции магнитного поля, напряжения и тока электронного пучка.

В п.3.2 излагаются результаты экспериментов с описанным выше гиротроном. Максимальная мощность излучения достигала 180 Вт при КПД 3.7 %. Были измерены частота генерации (0.2589 ТГц) и омические потери в резонаторе. При изменении магнитного поля наблюдалась возбуждение соседних мод $TE_{0,3}$ и $TE_{4,2}$, при этом мощность генерации моды $TE_{0,3}$ (150 Вт) на частоте 0.254 ТГц оказалась сравнима с мощностью рабочей моды. Стабильность частоты гиротрона составила $5 \cdot 10^{-6}$, а мощности 1 % в течение нескольких часов непрерывной работы, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым для спектроскопии высокого разрешения. Использование данного гиротрона позволило увеличить чувствительность ЯМР-спектрометра в 80 раз³⁰.

В п.3.3 представлены результаты анализа, выполненного для определения причин, обусловивших отличия расчетных и экспериментальных результатов. В частности, было показано, что наличие несоосности пучка и резонатора величиной 0.3-0.4 мм может объяснить такие наблюдавшиеся эффекты, как образование стоячей волны и возбуждение соседних мод с относительно высоким уровнем мощности.

В **четвертой главе** излагаются результаты теоретического исследования и экспериментальные данные, связанные с разработкой гиротрона с частотой 0.263 ТГц на первой гармонике гирочастоты.

В п.4.1 обсуждаются вопросы, связанные с оптимизацией и разработкой основных узлов гиротрона (магнетронно инжекционной пушки, резонатора, коллектора, встроенного квазиоптического преобразователя), а также описывается разработанная для данного комплекса автоматизированная система управления. Оценивается влияние несоосности электронного пучка на выходные характеристики гиротрона

³⁰ *Denysenkov V., Kiseliiov V.K., Prandolini M.M., Gafurov M., Krahn A., Engelke F., Bezborodov V.I., Kuleshov Ye.M., Nesterov P.K., Yanovsky M.S., Prisner T.F.* 260 GHz Quasioptical Setup for EPR and DNP experiments on the 9.2 Tesla DNP/NMR/EPR spectrometer // Proceedings of 7 Int. Symposium on Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov 2010

В п.4.2 приводятся результаты экспериментов, проведенных на данном гиротронном комплексе. Выходная мощность достигала значения более 0,9 кВт при токе электронного пучка $I = 0.4$ А, катодном напряжении 15 кВ. При этом максимальный КПД составил около 17%, что хорошо согласуется с результатами расчетов, проведенных на этапе разработки и проектирования гиротрона. Также был экспериментально реализован режим генерации при очень малом токе электронного пучка 0,02 А, в котором было получено достаточное для указанных приложений значение мощности около 10 Вт с КПД около 3%. В процессе проведенных экспериментальных исследований были измерены омические потери в стенке резонатора, а также получены зависимости выходной частоты от параметров для различных режимов работы.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

ГЛАВА 1 УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ГИРОТРОНА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1.1 Обзор истории освоения субтерагерцового и терагерцового диапазонов гиротронами и современное состояние исследований.

Расчетные модели, используемые для анализа электронно-волнового взаимодействия в гиротронах.

1.1.1 Обзор истории освоения субтерагерцового и терагерцового диапазонов гиротронами и современное состояние исследований.

В последнее время появился широкий ряд научных и научно-технических задач^{31,32}, для которых необходимо создание относительно маломощных источников терагерцового излучения (1-100 Вт). В первую очередь в этом диапазоне находится большое число сильных линий вращательных переходов малых молекул, а также линии колебательных и колебательно-вращательных переходов больших молекул, что позволяет исследовать данные вещества и селективно влиять на них. Во-вторых, терагерцовое излучение можно применять в биологии и медицине, в задачах томографии по выявлению патологий и инородных образований³³ и, возможно, в лечении заболеваний. Также это излучение можно использовать для обнаружения скрытых предметов, таких как оружие, взрывчатка и наркотики.

Другим активно развивающимся приложением СВЧ-приборов в терагерцовой области является диагностика и спектроскопия различных сред,

³¹ Братман В Л, Литвак А Г, Суворов Е В Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения // УФН, 2011, №181, С 867–874.

³² Nusinovich G.S., Pu R., Antonsen T.M., Jr. et al. Development of THz-range gyrotrons for detection of concealed radioactive materials // Int. J. IRMM&THz Waves, 2011, №32, P.380-402.

³³ Humphreys K et al. Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering // Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2004 V.2 P.1302

включая развитие методов парамагнитного резонанса и ядерного магнитного резонанса высокого разрешения, о которых далее будет сказано более подробно.

Основной причиной, по которой терагерцовый диапазон остается практически не освоенным, является тот факт, что соответствующие длины волн слишком малы для методов классической вакуумной электроники и слишком велики для методов квантовой электроники.

Кратко рассмотрим основные типы вакуумных источников когерентного излучения, которые используются в настоящий для освоения терагерцового диапазона и решения вышеперечисленных задач. Наиболее распространенными СВЧ-генераторами являются лампы обратной волны (ЛОВ), основанные на стимулированном черенковском излучении прямолинейных электронных пучков. В настоящее время существуют ЛОВ с частотой до 1.4 ТГц, например, производимые научно-производственным предприятием «Исток»³⁴. Данные приборы достаточно компактны и работают на сравнительно небольших ускоряющих напряжениях, однако их выходная мощность составляет величину порядка нескольких милливатт. Существует также более мощная разновидность ЛОВ с электронным пучком, наклоненным к замедляющей структуре – клинотрон, однако и его мощность недостаточна для большинства рассматриваемых приложений³⁵. То же самое можно сказать и о другом типе СВЧ-приборов со схожими параметрами – оротронах³⁶.

³⁴ Голант М.Б., Алексеенко З.Т., Короткова З. С. Широкодиапазонные генераторы субмиллиметрового диапазона волн// ПТЭ Т.12 №3 С. 231 1969.

³⁵ Лысенко Е.Е. и др. Состояние разработок клинотронов непрерывного действия // Электромагнитные волны и электромагнитные системы 2010, Т.11 №63.

³⁶ Bratman V. L. et al. Terahertz Orotrons and Oromultipliers // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010 №38 P.1466.

Еще одним видом терагерцовых СВЧ-источников являются лазеры на свободных электронах (ЛСЭ)³⁷, которые могут производить излучение высокого уровня мощности и частоты. Однако вся система ЛСЭ достаточно крупногабаритная, и как следствие очень дорогая. При этом она сложна в использовании неспециалистами.

В миллиметровом диапазоне длин волн наибольший уровень средней мощности обеспечивается гиротронами, одной из разновидностей мазеров на циклотронном резонансе (МЦР)^{38,39}. Гиротрон является автогенератором, в котором энергия вращения электронов в сильном магнитном поле переходит в ВЧ излучения в условиях гирорезонанса. Взаимодействие электронного пучка с одной из собственных мод круглого волновода происходит практически на частоте отсечки^{40,41}. Поскольку взаимодействие электронного пучка происходит с быстрой волной, распространяющейся практически поперек поступательного движения электронов, отсутствует необходимость в мелкомасштабных элементах замедляющих систем, принципиально необходимых для классических приборов вакуумной электроники, а также обеспечивается слабая чувствительность к скоростному разбросу. Как следствие, в гиротронах реализуются высокие КПД (до 70% в системах с

³⁷ *Gavrilov N. G.* Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL// Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 2007 №54 P.575.

³⁸ *Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К.* Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1967, Т.10, №9–10, С.1414-1453.

³⁹ *Запезалов В.Е.* Эволюция гиротронов // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2011, Т.54, №8–9, С.553–572.

⁴⁰ *Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Goldenberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K.* The gyrotron: high-power source of millimeter and submillimeter waves // Infrared Phys., 1978, Т.18, №6, 385-393.

⁴¹ *Nusinovich G.S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons //The Johns Hopkins University press Baltimore-London 2004

одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов⁴²⁾ и мощность (2 МВт на частоте 0.17 ТГц⁴³ и 0.2 МВт на частоте 0.67 ТГц⁴⁴).

Ниже будет кратко рассмотрена история развития субтерагерцовых гиротронов в России, а также представлена общая оценка современного состояния исследований в данной области.

Одним из первых построенных и испытанных субмиллиметровых гиротронов был гиротрон с частотой 0.315 ТГц, работающий на моде $TE_{2,3}$, синхронной со второй гармоникой гирочастоты. При напряжении 27 кВ и токе пучка 0,9 А были достигнуты рекордные для данной области параметров значения мощности и КПД (1,6 кВт и 6% соответственно, в непрерывном режиме)⁴⁵. Исследования гиротронов этого диапазона частот в ИПФ РАН были активно продолжены, и в начале 80-х был проведен ряд экспериментов с двухчастотным гиротроном на частотах 0.25 и 0.28 ТГц. При этом были исследованы не только зоны генерации рабочей моды, но и соседних мод, возбуждающихся на первой и второй гармониках гирочастоты⁴⁶. Также в это время были проведены работы по созданию импульсных гиротронов с частотами вплоть до 0.65 ТГц: была получена пиковая мощность на уровне 10-100 кВт при длительности импульса до 50 мкс⁴⁷.

⁴² Denisov G.G., Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion, Nuclear Fusion, 2008, V.48, №1, 054007:1-5.

⁴³ Yu.V.Bykov, N.S.Ginzburg, M.Yu.Glyavin, S.V.Golubev, G.G.Denisov, A.G.Luchinin, V.N.Manuilov The development of gyrotrons and their applications for plasma science and material processing // International Journal of Terahertz Science and Technology 2014, V.7, №2, P.70-79.

⁴⁴ Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Nusinovich G.S. et al. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // Appl. Phys. Lett., 2012, №101, 153503:1-4.

⁴⁵ Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А. // Радиотехника и электроника, 1974, Т.19, №5, С.1056-1060.

⁴⁶ Глявин М.Ю., Гуртовник А.А., Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б. // В сб.: Гиротроны / ИПФ АН СССР. Горький, 1989. С.73-83.

⁴⁷ Flyagin V.A., Luchinin A.G., Nusinovich G.S. // Int. J. Infrared Millimeter Waves 1983 №4 P.629.

В 90-годы работы в данной области были приостановлены, так как, с одной стороны, такие гиротроны еще не были широко востребованы, а с другой стороны, наиболее актуальной и динамично решаемой задачей стало создание мощных мегаваттных гиротронов для задач управляемого термоядерного синтеза, имеющих частоту до 0.17 ТГц. Стоит также отметить, что проблема продвижения гиротронов в терагерцовый диапазон тесно связана с разработкой новых типов криомагнитов, которые позволяют получать магнитные поля с величиной индукции 10-20 Тл и длиной однородного участка несколько десятков миллиметров.

В начале 2000-х данные исследования вновь стали проводиться более интенсивно. В результате проводимых в ИПФ РАН исследований были достигнуты рекордные значения частоты для импульсных гиротронов (см. рисунок 1.1)⁴⁸.

В настоящее время работы по созданию маломощных субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов ведутся практически во всех основных научных центрах, занимающихся вакуумной электроникой, например, центр разработки приборов дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, Фукуи, Япония), Массачусетский Технологический Институт (MIT, США), и другие. Созданы коммерческие фирмы, основной деятельностью которых является создание гиротронов для перечисленных выше приложений. В таблице 1.1 указаны часть мировых результатов в данной области исследований.

В Массачусетском технологическом институте (США) был создан ряд маломощных субтерагерцовых гиротронов на второй гармонике гирочастоты. В гиротроне с частотой 0.33 ТГц максимальная мощность при этом составила 18 Вт при ускоряющем напряжении 10 кВ и токе 190 мА⁴⁹. Также был создан

⁴⁸ *M.Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, and G.Yu. Golubiatnikov, Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // PRL 2008 №100, 015101.*

⁴⁹ *Antonio C. Torrezan, Michael A. Shapiro, et al. Operation of a Continuously Frequency-Tunable Second-Harmonic CW 330-GHz Gyrotron for Dynamic Nuclear Polarization // IEEE Trans. Elec. Dev 2011V. 58, P. 2727-2783.*

непрерывный гиротрон с частотой 0.46 ТГц. Максимальная мощность при этом составила 16 Вт при ускоряющем напряжении 13 кВ и токе 100 мА.

В настоящее время в MIT ведутся работы по созданию непрерывного 0.52 ТГц гиротрона⁵⁰. В гиротроне с частотой генерации 0.33 ТГц удалось получить сравнительно плавную перестройку частоты с шириной полосы 1 ГГц⁵¹. Также продемонстрирована возможность работы гиротрона на сверхмалых напряжениях (до 2.5 кВ)⁵² и многодневная стабильная работа комплекса (до 21 дня).

Аналогичные разработки проводятся и в другом центре США, занимающимся разработкой гиротронов, а именно компании CRI (г. Пало Альто). Совместно с компанией Bruker Biospin впервые реализованы коммерческие комплексы, включающие как гиротронную часть со всем необходимым оборудованием, так и сам ЯМР-спектрометр. На рисунке 1.2 представлена схема, фотография и выходные характеристики одного из таких гиротронов с частотой 260 ГГц, работающего в условиях основного циклотронного резонанса⁵³.

⁵⁰ S. Jawla, E. Nanni, et al. Design of a 527 GHz gyrotron for DNP-NMR spectroscopy // Proc. 2011 Intl. Conf. IR, MM and THz Waves 2011.

⁵¹ Torrezan A. C., Shapiro M. A., Sirigiri J. R. et al. // IEEE Trans. 2011. V. ED-58. №8. P.2777.

⁵² M. K. Hornstein; V. S. Bajaj, R. G. Griffin; and R. J. Temkin. Efficient low-voltage operation of a CW gyrotron oscillator at 233 GHz // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35, 1, 27-30, (2007).

⁵³ Bruker Biospin, 263 GHz Solid State DNP-NMR Spectrometer. Available: <http://www.bruker-biospin.com/dnp-dir.html> (дата обращения 02.02.2015)

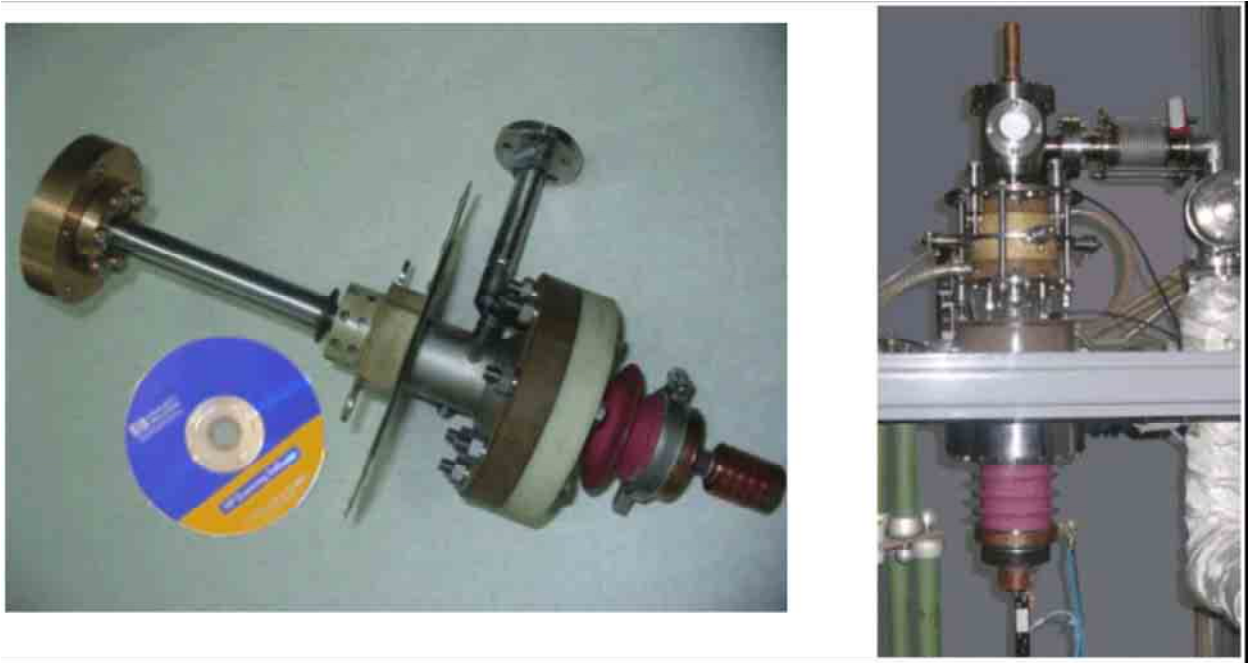


Рисунок 1.1 Общий вид импульсных гиротронов на частоту 1-1.3 ТГц

Таблица 1.1 Некоторые мировые результаты исследований субмиллиметровых непрерывных гиротронов.

| год | Страна, организация | Частота, ТГц | Гармоника | Рабочая мода | Ток пучка, А | Ускоряющее напряжение, кВ | Выходная мощность, Вт |
|------|---------------------|--------------|-----------|-------------------|--------------|---------------------------|-----------------------|
| 2011 | Япония, FIR FU | 0.58 | 2 | TE _{3,7} | 0.37 | 18 | 6 |
| 2014 | США, CPI | 0.26 | 1 | TE _{0,3} | 0.05 | 14 | 70 |
| 2011 | США, MIT | 0.33 | 2 | TE _{4,3} | 0.19 | 13 | 18 |
| 2014 | Россия, ИПФ РАН | 0.26 | 1 | TE _{5,3} | 0.4 | 14 | 1000 |

Еще одной научной организацией, связанной с созданием субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов является Центр разработки приборов дальнего инфракрасного диапазона (FIR UF, г.Фукуи, Япония)⁵⁴. После продолжительных исследований, ориентированных на достижение высоких частот генерации⁵⁵, в настоящее время работы Центра направлены на создание непрерывных гиротронов со встроенным квазиоптическим преобразователем для задач спектроскопии. Следует отметить, что именно FIR FU наиболее активно ищет новые приложения для использования относительно мощного суб-ТГц и ТГц излучения. Первыми экспериментами в данной области стало создание 0.495 ТГц гиротрона на первой гармонике гирочастоты. В настоящее время наиболее интересными исследованиями в данной области представляются опыты на установке использующем криомагнит с напряженностью поля около 20 Тл⁵⁶. Получена генерация различных мод, как на первой, так и на второй гармонике гирочастоты Максимальная полученная частота составила более 1 ТГц при выходной мощности порядка долей Вт, однако добиться стабильной, воспроизводимой работы в этом гиротроне не удалось.

Таким образом, в настоящее время гиротроны являются наиболее перспективными источниками относительно мощного субтерагерцового и терагерцового излучения. Они компактнее и требует более низких ускоряющих напряжений, чем лазеры на свободных электронах, а уровень их выходной мощности составляет величину от десятков ватт до нескольких киловатт, что вполне достаточно для решения перечисленных выше задач.

⁵⁴ T. Kikunaga, N Sato, H. Shimawaki, T Suzuki, K. Yokoo, S Ono, G. Kido, Y. Terumichi Design and the first experiment of a 1 THz gyrotron // Electron Devices Meeting, 1993. IEDM '93. Technical Digest

⁵⁵ Idehara T., Saito T., Ogawa I. // Thin Solid Films 2008, V. 517. № 4. P.1503.

⁵⁶ T. Idehara, I. Ogawa, H. Mori, S. Kobayashi, S. Mitsudo, and T. Saito A THz gyrotron FU CW III with a 20 T superconducting magnet // Proc. 33rd Int. Conf. Infrared, Millim. Terahertz Waves, Pasadena, CA, 2008, P. 1–2

Наиболее развивающейся и хорошо изученной областью применения субмиллиметровых гиротронов является динамическая поляризация ядер (ДПЯ) в установках по ядерному магнитному резонансу (ЯМР). Эффект динамической поляризации ядер состоит в увеличении интенсивности ядерного магнитного резонанса и поляризации ядерной магнитной системы при насыщении электронного парамагнитного резонанса⁵⁷. Данный эффект наблюдается в условиях, когда в электронной парамагнитной системе существует релаксационный процесс, содержащий в каждом акте связанное однонаправленное изменение ядерных спиновых переменных и определяющий стационарное состояние ядерной магнитной системы.

При этом на источник электромагнитного излучения накладываются следующие условия

1. Частота, соответствующая ядерному парамагнитному резонансу, для обслуживания современных спектрометров частота внешнего источника должна находиться в диапазоне 0.26-0.66 ТГц.
2. мощность излучения порядка 1-100 Вт на выходе из передающей линии
3. многочасовая непрерывная работа прибора
4. высокая стабильность выходных параметров

В таблице 1.2 указаны основные частоты, используемые в ЯМР установках с ДПЯ, соответствующие частоты накачки и магнитные поля, необходимые для создания гиротронов на первой гирогармонике. Отметим основные проблемы, связанные с разработкой и оптимизацией рассматриваемого типа гиротронов. Повышение выходной частоты излучения ведет к увеличению ведущего магнитного поля в резонаторе, что приводит к усложнению и удорожанию конструкции сверхпроводящего соленоида, а при дальнейшем увеличении практически и к невозможности изготовления соленоида при использовании современных технологий. Выходом из подобной

⁵⁷A. Abragam, M. Goldman. Principles of dynamic nuclear polarisation // *Rep. Prog. Phys.* 197841 395

ситуации является использование излучения на гармониках гирочастоты. При этом возникает сильная конкуренция со стороны мод резонатора, синхронных с первой гармоникой гирочастоты, так их стартовые токи на порядок меньше, чем стартовые токи рабочих мод. Таким образом, приходится использовать в качестве рабочих моды со сравнительно низкими индексами, которые обладают достаточно редким спектром. Как следствие, радиус электронного пучка в резонаторе уменьшается, и вместе с уменьшением длины волны это приводит к тому, что эффективная площадь поперечного сечения пучка и максимальная величина тока заметно снижаются. При этом оптимальная по КПД точка в пространстве параметров оказывается принципиально недостижимой. Уменьшение объема используемого резонатора, а также возросший относительный объем скин-слоя приводит к существенному росту омических потерь в резонаторе вплоть до 80-90% от мощности, отнимаемой от электронного пучка.

Суммируя вышесказанное, можно сказать, что оптимизация маломощного субмиллиметрового гиротрона заключается, главным образом, в подборе параметров электродинамической системы, при которой, несмотря на большие омические потери, достигается максимально высокий КПД и осуществляется селекция паразитных мод, особенно на более низких гармониках гирочастоты.

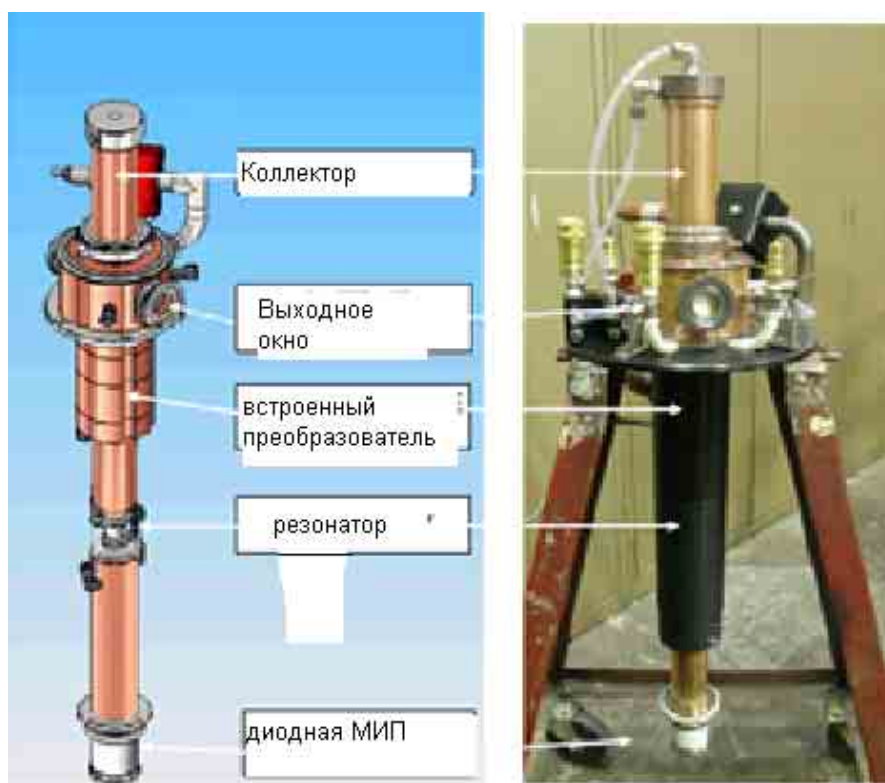


Рисунок 1.2 Схема и внешний вид гиротрона с рабочей частотой 0.26 ТГц, разработанного СРІ и Bruker Biospin

Таблица 1.2 Основные частоты ЯМР, используемые в установках с ДПЯ а также соответствующие частоты гиротронов и магнитные поля.

| Частота ядерного магнитного резонанса, МГц | Частота гиротрона, ТГц | Магнитное поле, Т |
|--|------------------------|-------------------|
| 400 | 0.26 | 9.4 |
| 500 | 0.33 | 11.8 |
| 600 | 0.395 | 14.3 |
| 700 | 0.46 | 16.4 |
| 800 | 0.527 | 18.8 |
| 900 | 0.593 | 21.4 |
| 1000 | 0.66 | 23.9 |

1.1.2 Описание расчетных моделей гиротрона.

Большая часть приводимых в диссертации расчетов была проведена на основе самосогласованной одномодовой системы уравнений для модели с нефиксированной структурой высокочастотного (ВЧ) поля^{58,59}.

$$\frac{dp_{\perp}}{dz} = \operatorname{Re} \left[\left(\frac{iF}{\beta_z} + \frac{1}{k} \frac{dF}{dz} \right) e^{-i\theta} \right] \cdot k_{\perp} \cdot J'_n(\xi) \cdot G_{mp}^{1/2} + \frac{p_{\perp}}{2B_0} \cdot \frac{dB_0}{dz}; \quad (1.1)$$

$$p_{\perp} \frac{d\theta}{dz} + \frac{p_{\perp}}{\beta_z} \left(\frac{k}{n} - \frac{\omega_{H0}}{c \cdot \gamma} \right) = \operatorname{Re} \left[\left(\frac{F \cdot (1 - \beta_{\perp}^2 \gamma / \gamma_0)}{\beta_z} - \frac{i}{k} \frac{dF}{dz} \right) e^{-i\theta} \right] \cdot \frac{k_{\perp}}{\xi} \cdot J_n(\xi) \cdot G_{mp}^{1/2}; \quad (1.2)$$

$$\frac{dp_z}{dz} = -\operatorname{Re} \left[\frac{dF}{dz} e^{-i\theta} \right] \cdot \frac{p_{\perp} \cdot k_{\perp}}{p_z \cdot k} J'_n(\xi) \cdot G_{mp}^{1/2} - \frac{p_{\perp}^2}{p_z} \frac{1}{2B_0} \frac{dB_0}{dz}; \quad (1.3)$$

$$\frac{d^2 F}{dz^2} + h^2 F = I \cdot k \cdot \frac{p_{\perp}}{p_z} e^{i\theta} \cdot k_{\perp} \cdot J'_n(\xi) \cdot G_{mp}^{1/2} \quad (1.4)$$

Здесь z - координата вдоль оси гиротрона, $p_{\perp} = \beta_{\perp} \cdot \gamma$, $p_z = \beta_z \cdot \gamma$ - относительные вращательный и продольный импульсы электрона, $\beta_{\perp} = v_{\perp} / c$, $\beta_z = v_z / c$ - отношения скоростей электрона к скорости света, $\gamma = (1 + p_{\perp}^2 + p_z^2)^{1/2}$, I - параметр пропорциональный току пучка, θ - фаза вращательного движения электрона, $F(z)$ - функция продольного распределения ВЧ поля, $k = \omega / c$ - волновое число, $k_{\perp} = \rho_s / R$ - поперечное волновое число, ρ_s - корень уравнения $J'_m(\rho) = 0$, соответствующий рассматриваемой TE_{mp} моде резонатора с азимутальным m и радиальным p индексами, $J'_m(\rho)$ - производная функции Бесселя $J_m(\rho)$ по аргументу, $R = R(z)$ - зависимость радиуса резонатора и волноводных переходов от продольной координаты, $\xi = k_{\perp} \cdot a$, $a = p_{\perp} \cdot c / \omega_{H0}$ - радиус электронной орбиты, $\omega_{H0} = eB_0 / m_{e0}$ - нерелятивистская циклотронная частота, $B_0(z)$ - распределение статического магнитного поля. G_{mp} - структурный

⁵⁸ А.А. Кураев, И.С. Ковалев, С.В. Колосов. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ // - Минск: Наука и техника, 1975.

⁵⁹ Moiseev M.A., Nemirovskaya L.L., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A. // Int. J. Infrared and MM Waves, 1997. V.18. №11. P.2117.

фактор, определяющий связь электронного пучка и моды и определяющийся по формуле:

$$G_{mp} = \frac{J_{m-n}^2(v_{mp} R_0 / R_p)}{J_m^2(v_{mp}) (v_{mp}^2 - m^2)}. \quad (1.5)$$

здесь v_{mp} - корень уравнения $J'_m(v_{mp}) = 0$, соответствующий рассматриваемой $TE_{m,p}$ моде, $J_m(v_{mp})$ - функция Бесселя,

Данные уравнения получены в результате усреднения уравнений движения электронов в статическом магнитном поле B_0 и поле рабочей TE_{mp} моды резонатора по периоду высокой частоты $T = 2\pi/\omega$. Радиус волновода изменяется вдоль продольной оси достаточно медленно и переизлучение рабочей моды в волны с другими радиальными индексами не учитывается в большинстве расчетов. В приведенных уравнениях также не учитывается влияние сил ВЧ пространственного заряда на КПД⁶⁰, хотя в дальнейшем мы рассмотрим данный эффект применительно к субмиллиметровым гиротронам.

Уравнения (1.1) - (1.4) интегрируются с граничными условиями, соответствующими немодулированному электронному пучку и экспоненциальному спаду ВЧ поля во входном закритическом сечении резонатора z_H :

$$p_{\perp} = p_{\perp 0}, \quad p_z = p_{z0}, \quad \theta = \theta_0, \quad dF/dz = |h| \cdot F,$$

где $p_{\perp 0}$, p_{z0} не зависят от θ_0 ($0 \leq \theta_0 \leq 2\pi$). В выходном сечении z_K должны выполняться условия излучения:

$$dF/dz = -ih \cdot F, \quad h > 0. \quad (1.6)$$

Омическая добротность Q_{ohm} в гиротронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, как правило, в 1.5–2 раза меньше добротности резонатора из идеальной меди, вследствие шероховатости стенки. Значение Q_{ohm} вычислялось с учетом эмпирического множителя 0.5 по следующей формуле:

⁶⁰ Вайнштейн Л.А. «Электромагнитные волны» // М. «Радио и связь», 1988.

$$Q_{ohm} = 680 \cdot v_{mp} \left(1 - m^2 / v_{mp}^2\right) \sqrt{\lambda(mm)}. \quad (1.7)$$

где, λ - длина волны в свободном пространстве в миллиметрах. В главах 3 и 4 диссертации вопрос уточнение эмпирического множителя будет разобран более детально.

Нелинейное взаимодействие двух и более мод рассчитывалось с помощью многомодовой нестационарной модели с самосогласованной структурой ВЧ поля, которая учитывала все приведенные выше факторы⁶¹.

Данная модель была успешно применена при анализе электронно-волнового взаимодействия в мощных гиротронах для управляемого термоядерного синтеза и гиротронах средней мощности для технологических приложений. Поэтому прежде чем приступить к проектированию и разработке новых субтерагерцовых гиротронов желательно проанализировать результаты уже проведенных экспериментов, что позволит путем сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования выделить наиболее важные эффекты, и при необходимости уточнить данную расчетную модель.

Для анализа использовались результаты трех экспериментов с непрерывными гиротронами^{62,63}:

1. Гиротрон с рабочей модой $TE_{2,3}$ на частоте 0.315 ТГц, работающий на второй гармонике (знак минус у моды соответствует противоположному вращению электронов и поля моды)⁶⁴,

⁶¹ *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A.* // Int. J. Electronics, 1986, V.61, No.6, pp.881-894.

⁶² *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Численное моделирование непрерывных субмиллиметровых гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №5-6, С.408-417.

⁶³ *Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Влияние несоосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона. Изв. ВУЗов Радиофизика, 2011, 54, 6, 444-450

⁶⁴ *Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А.* Гиротроны диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн // Радиотехника и электроника, 1974, 19, 5, 1056-1060

2. Гиротрон с рабочей модой $TE_{22,8}$, работающий на основном циклотронном резонансе на частоте 0.3 ТГц⁶⁵,

3. Гиротрон с рабочими модами $TE_{6,5}$ и $TE_{8,5}$ на второй гармонике гирочастоты, с частотами 0.25 ТГц и 0.28 ТГц, соответственно.

Сравнивая приведенные экспериментальные данные с результатами численного моделирования, можно, определить такие параметры электронного пучка, как питч-фактор и разброс скоростей, типичные для гиротронов данного частотного диапазона. В непрерывных 0.14-0.17 ТГц гиротронах на основном циклотронном резонансе электронные пучки обычно имеют питч-фактор $g \approx 1,2 - 1,4$ и относительный разброс поперечных скоростей $\delta v_{\perp} = 0,3 - 0,4$ ⁶⁶. В силу сходства электронно-оптических систем (магнетронно-инжекторных пушек) можно предполагать, что и электронные пучки рассматриваемых гиротронов будут иметь близкие параметры. Таким образом, расчет выходных характеристик при различных параметрах электронного потока позволит, с одной стороны, уточнить истинные параметры электронного пучка, а также проверить адекватность системы уравнений и используемых приближений для расчета реальных приборов.

Здесь и далее моды, генерирующие на первой гармонике гирочастоты, обозначаются $n = 1$, генерирующие на второй гармонике $n = 2$ и т.д.

⁶⁵ *T. Saito, T Nakano, H. Hoshizuki et all* Perfomance test of CW 300 GHz Gyrotron FU CW I// Int. J. Infrared and MM Waves, 2007. V.28. P.1063

⁶⁶ *Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., Postnikova A.S., Zapevalov V.E.* // Int. J. Infrared and MM Waves, 1999. V.20. №3. P.361.

1.2 Анализ электронно-волнового взаимодействия в непрерывных суб-ТГц гиротронах

1.2.1 Непрерывный гиротрон с частотой 0.315 ТГц

Одной из первых реализаций субмиллиметровых гиротронов был разборный «прямой» (т.е. с выводом излучения на рабочей моде, без квазиоптического преобразователя) гиротрон с непрерывной откачкой, работающий на второй гармонике (мода $TE_{2,3}$ на частоте 0.315 ТГц). При напряжении 27 кВ и токе пучка 0.9 А были достигнуты рекордные для того времени значения мощности и КПД (1.6 кВт и 6% соответственно)⁶⁷. Сравнивая зависимости мощности от тока пучка при фиксированном напряжении с результатами численного моделирования, можно определить параметры электронного пучка, такие как питч-фактор и разброс скоростей.

На рисунке 1.3 приведены экспериментальные зависимости КПД и мощности излучения от тока электронного пучка и расчетные значения питч-фактора, для которых результаты численного моделирования с графической точностью соответствуют экспериментальным данным. Анализировалась идеализированная модель без разброса скоростей и модель с величинами относительного разброса поперечных скоростей электрона $\delta v_{\perp} = 0.3, 0.4$ (На рисунке 1.3 кружки - $\delta v_{\perp} = 0$, треугольники - $\delta v_{\perp} = 0.3$, квадраты $\delta v_{\perp} = 0.4$).

Значения $\delta v_{\perp} > 0.4$ можно не рассматривать, поскольку при $\delta v_{\perp} g^2 > 0.7$ обычно нарушается устойчивость формирования электронного пучка магнетронно-инжекторной пушкой (МИП)⁶⁸.

Как видно из рисунка 1.3, расчетные значения питч-факторов близки к экспериментально полученным значениям для МИП гиротронов коротковолновой части миллиметрового диапазона на первой гармонике

⁶⁷ Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А. Гиротроны диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн // Радиотехника и электроника, 1974, 19, 5, 1056-1060

⁶⁸ Sh.E. *Tsimring* Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics // Published by John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.

гирочастоты, что подтверждает обоснованность выбранных расчетных параметров и поправочных эмпирических коэффициентов для расчета омической добротности резонатора. При этом питч-фактор увеличивается с уменьшением тока пучка, что согласуется с электронно-оптической теорией и ранее полученными экспериментальными результатами.

Разброс скоростей электронов обычно уменьшает стартовый ток рабочей моды гиротрона⁶⁹. Для величин токов пучка, существенно меньше тока, оптимального по КПД, увеличение разброса при остальных фиксированных параметрах может привести и к увеличению КПД. Таким образом, можно объяснить наблюдаемый в расчетах эффект, согласно которому, при увеличении разброса скоростей питч-фактор электронов, соответствующий экспериментальному КПД, уменьшается.

⁶⁹ Антаков И.И., Ергаков В.С., Засыпкин Е.В., Соколов Е.В. // Изв. вузов. Радиофизика, 1977. Т.20. №4. С.605-611.

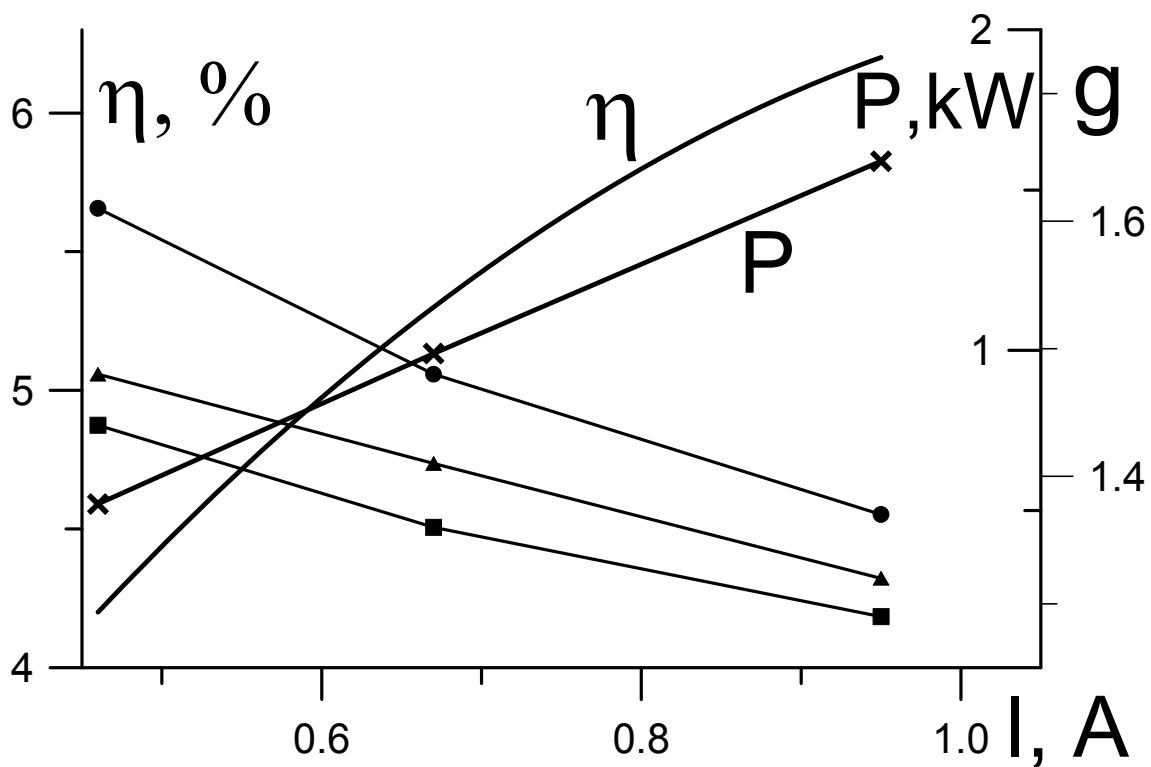


Рисунок 1.3. Толстые линии - экспериментальные зависимости КПД и мощности излучения от тока гиротрона на частоте 0.315 ТГц, тонкие линии - расчетные значения питч-фактора, для которых результаты численного моделирования совпадают с экспериментальными данными

1.2.2 Гиротрон с частотой 0.3 ТГц на первой гармонике гирочастоты

Второй из рассматриваемых примеров: непрерывный 0.3 ТГц гиротрон на первой гармонике гирочастоты был создан в ИПФ РАН совместно с НПП «ГИКОМ» для экспериментального комплекса по исследованию новых материалов, биологических и медицинских приложений в Центре по разработке приборов дальнего инфракрасного диапазона университета г. Фукуи, Япония. Расчетная мощность излучения при ускоряющем напряжении 15 кВ, токе электронного пучка до 1 А, и питч-факторе 1.2 составила 3.5 кВт. Однако первоначальные экспериментальные исследования показали, что уровень мощности составляет около 1.6-2.3 кВт⁷⁰. При ускоряющем напряжении больше 13 кВ режим генерации становится двухчастотным и КПД перестает расти. Ограничение мощности наступает при возникновении двухчастотного режима с близкими частотами генерации. После прохождения квазиоптического преобразователя излучение выходило из окна в виде двух узконаправленных пучков с гауссовой структурой поля, распространяющихся под близкими, но различными углами к оси симметрии окна. Причины такого эффекта, связанного по видимому с возбуждением (или трансформацией части излучения) в паразитные моды (моду) могут быть различными⁷¹, например, малый питч-фактор электронов, большой разброс скоростей пучка ($\delta v_{\perp} > 0.3$), неточности при изготовлении электродинамической системы, формирующего из рабочей моды $TE_{22,8}$ узконаправленный гауссов волновой пучок, рассогласованность выходного окна.

Как показало численное моделирование, КПД описываемого гиротрона слабо зависит от разброса скоростей электронов δv_{\perp} и определяется главным

⁷⁰ В.Е. Запезалов, В.К. Лыгин, О.В. Малыгин, М.А. Моисеев, В.И. Хижняк, В.П. Карпов, Е.М. Тай, Т. Идехара, С. Мицудо. И. Огава, Т. Сайто. Мощный генератор непрерывного электромагнитного излучения частотой 300 ГГц.// Изв. Вузов. Радиофизика, 2007, Т.50, №6, С.461-470.

⁷¹ S. Sabchevski, T. Saito, T. Idehara et al Simulation of mode interaction in the Gyrotron FU CW I// Int. J. Infrared and MM Waves, 2007. V.28. №5. P.1079.

образом питч-фактором электронного пучка. В таблице 1.3 приведены значения КПД для рабочей моды $TE_{22,8}$.

Как уже отмечалось, в непрерывных и длинноимпульсных гиротронах коротковолновой части мм диапазона (0.11-0.17 ТГц) питч-фактор электронного пучка составляет $g=1.1-1.5$, а относительный разброс поперечных скоростей электронов $\delta v_{\perp} \approx 0.3$. Аналогичные расчетные параметры имеет и магнетронно-инжекторная пушка рассматриваемого гиротрона. Даже при питч-факторе пучка $g=1-1.2$ и разбросе скоростей $\delta v_{\perp} \approx 0.3$ расчетная мощность излучения составляет около 4 кВт. Достигнутая же в эксперименте мощность 1.6 кВт получается в расчетах при питч-факторе $g \approx 0.9$. Вероятность ошибки в изготовлении и проектировании элементов электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона, которая может привести к таким результатам, представляется пренебрежимо малой.

Причиной двухчастотной генерации может быть асимметрия, то есть отличие поперечного сечения резонатора от круга⁷². В этом случае возникает связь мод $TE_{m,p}$ и $TE_{-m,p}$, вращающихся в противоположных направлениях и возможна генерация связанных мод $TE_{\pm 22,8}$ и $TE_{\pm 19,9}$, имеющих компоненты, проходящие через квазиоптический преобразователь и образующие гауссовы пучки. Однако, для связи мод с противоположным вращением нужна гофрировка, имеющая пространственную гармонику с числом периодов по азимуту $N=2m=44$ и амплитудой данной гармоники порядка $\Delta R > R_p / Q \approx 1$ мкм⁷³, что маловероятно и практически не наблюдается.

Одной из вероятных причин снижения КПД и двухчастотной генерации может быть отличие радиуса электронного пучка от оптимального значения $R_{0,opt} = 3.71$ мм. При небольшом отличии радиуса пучка от оптимального рабочая

⁷² Нусинович Г.С. Конкуренция мод в гиромонотроне с нарушенной аксиальной симметрией // Радиотехника и электроника, 1974, Т.19, №8, С.1788-1789.

⁷³ А. Найфе Введение в методы возмущений // Москва «Мир» 1984 С. 447

мода имеет близкий к максимальному $G_{m,p}$ -фактор, при этом он больше $G_{m,p}$ -факторов паразитных мод. Значительные отклонения R_0 от оптимального значения маловероятны, так как согласно адиабатической теории МИП значению $\Delta R_0 = R_0 - R_{0,opt} = 0.2 \text{ mm}$ соответствует изменение перемагничивания B_0/B_k на 10%. В таком случае питч-фактор меняется от среднего $g = 1.2$ до $g = 0.87 - 2.2$. Численные расчеты показали, что в интервале $-0.2 \text{ mm} < \Delta R_0 < 0.2 \text{ mm}$ возбуждается только одна мода (либо рабочая $TE_{22,8}$ либо с противоположным вращением). В качестве примера на Рис 1.4 приведены результаты численного моделирования четырехволнового взаимодействия мод $TE_{22,8}$, $TE_{-22,8}$, $TE_{-19,9}$ $TE_{-14,11}$ для величины отклонения радиуса от оптимального $\Delta R_0 = 0.14 \text{ mm}$.

Асимметричность электронного пучка в резонаторе может быть связана с неоднородностью эмиссии катода, непостоянством питч-фактора и величины разброса скоростей по азимуту⁷⁴. Также существенным фактором может быть влияние несоосности электронного пучка и резонатора^{75,76}. На рисунке 1.5 приведены зависимости усредненных по азимутальной координате $G_{m,p}$ -факторов рабочей и конкурирующих мод от величины отклонения оси электронного пучка от оси резонатора ΔR при сохранении оптимального радиуса пучка $R_0 = 3.71 \text{ mm}$. Эти усредненные факторы, которые затем можно использовать для оценки стартовых токов и КПД вычислялись по следующей формуле:

⁷⁴ Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M., Antonsen T.M., Cauffman S. Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // Phys. Plasmas, 2001, V. 8, no.7, 3473

⁷⁵ Idehara, T.; Shibutani, K.; Nojima, H.; Pereyaslavets, M.; Yoshida, K.; Ogawa, I.; Tatsukawa, T. Study of Electron Beam Misalignment in a Submillimeter Wave Gyrotron // International Journal of Infrared and Millimeter Waves 1998 V 01 №19 P.1303-1316,

⁷⁶ O. Dumbrajs Eccentricity of the electron beam in a gyrotron cavity // International Journal of Infrared and Millimeter Waves Volume 15, Number 7, 1255-1262, 1994

$$G_{mp} = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} J_{m-n}^2(v_{mp} (R_{00} + d \cdot \cos(\psi)) / R_p) d\psi}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)} \quad (1.8)$$

где R_{00} – радиус несмещенного пучка, d – расстояние от оси пучка до оси резонатора (величина смещения).

Из рисунка 1.5 видно, что в отсутствии смещения электронного пучка конкурировать могут только две моды $TE_{22,8}$ и $TE_{-19,9}$, $G_{m,p}$ -факторы других мод в 2-3 раза меньше. КПД рабочей моды зависит от ΔR слабее, чем $G_{m,p}$ и стартовый ток, особенно при малых питч-факторах. На рисунке 1.6 приведены зависимости экспериментального и расчетного КПД для различных величин несоосностей электронного пучка. Различие в положениях зон генерации по магнитному полю можно объяснить разницей между проектным значениям радиуса резонатора и реальной величиной радиуса, получившейся в процессе изготовления. Мощность излучения $P=2.3$ кВт, после учета потерь в КОП и окне 30% сравнивается с экспериментальной ($P=1.6$ кВт) при $g=1.2$ и перекосе пучка $\Delta R=0.35$ мм. На рисунке 1.7 показаны временные зависимости трех мод $TE_{22,8}$, $TE_{19,9}$ и $TE_{-19,9}$. При всех начальных условиях после первоначального возбуждения других мод устанавливается мода $TE_{22,8}$. При большой несоосности $\Delta R=0.5$ мм присутствуют все моды (рисунок 1.8), но по сравнению с амплитудой моды $TE_{-22,8}$ амплитуды остальных мод малы. В принципе можно считать, что есть моды, вращающиеся в одном направлении ($TE_{-22,8}$ с большой амплитудой и $TE_{-19,9}$ с малой). Но для эффективного прохождения этих мод через преобразователь необходимо сменить направление магнитного поля в соленоиде (сменить полярность источника питания) - тогда направление вращения обеих мод сменится. Таким образом, различия экспериментальных данных и результатов расчетов для 0.3 ТГц непрерывного гиротрона могут быть объяснены, главным образом, несоосностью электронного пучка относительно оси резонатора

Таблица 1.3 КПД 0.3 ТГц гиротрона для различных параметров электронного пучка.

| g | 0.8 | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.5 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $\delta v_{\perp} = 0$ | 0.13 | 0.25 | 0.3 | 0,34 | 0.41 | 0.43 |
| $\delta v_{\perp} = 0.3$ | 0.13 | 0.25 | 0.29 | 0.33 | 0.38 | 0.4 |
| $\delta v_{\perp} = 0.6$ | 0.13 | 0.23 | 0.26 | 0.28 | 0.31 | 0.32 |

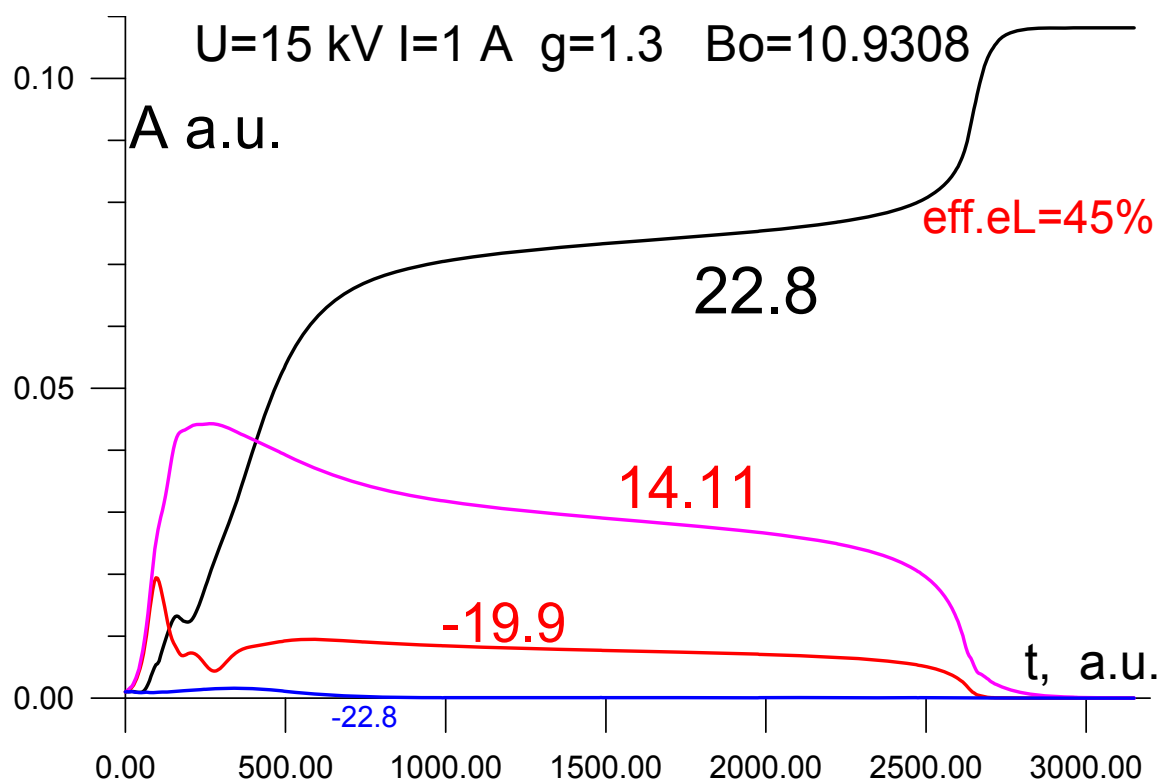


Рисунок 1.4. Временные зависимости амплитуд мод в резонаторе при радиусе пучка на 0.14 мм больше оптимального.

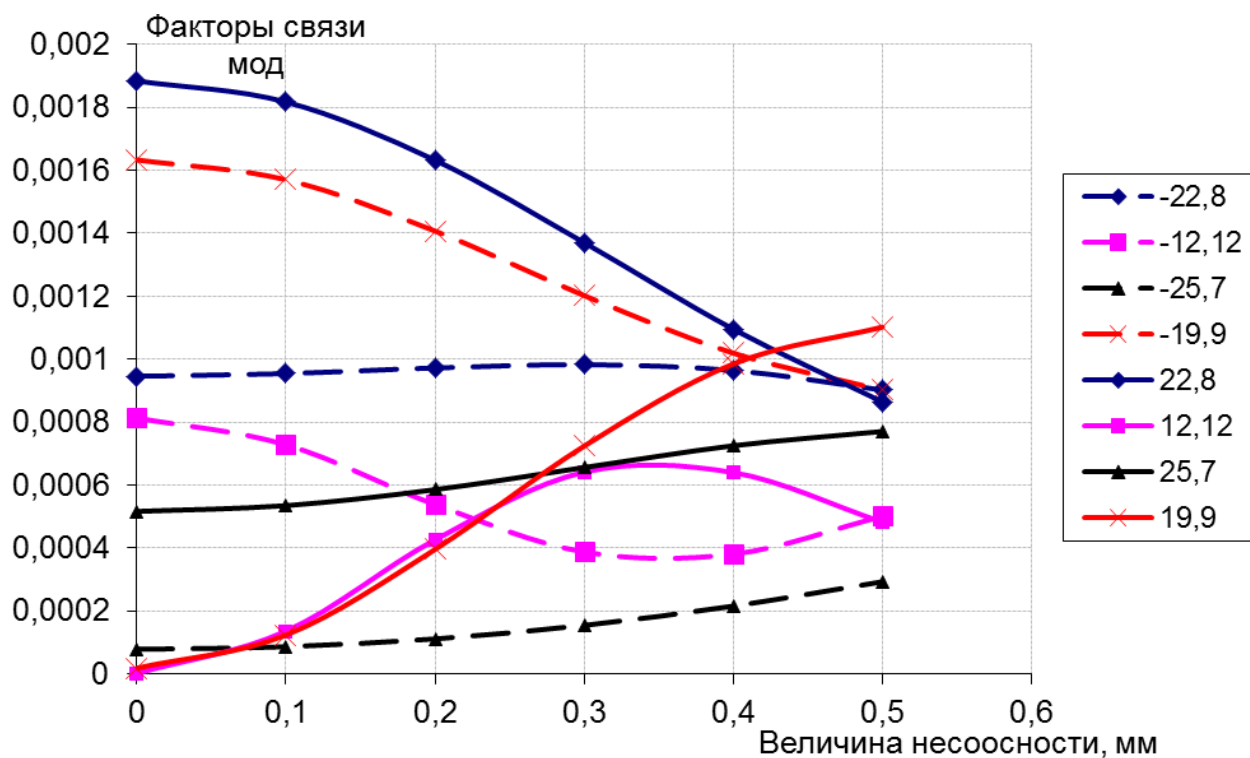


Рисунок 1.5. Структурные факторы рабочей $TE_{22,8}$ и конкурирующих мод при оптимальном радиусе электронного пучка $R_0=3.71$ мм ($R_p=8.39$ мм). Зависимость от перекоса электронного пучка (ΔR в мм). Сплошные кривые – нормальное вращение моды (проходит через КОП), штриховые – противоположное вращение.

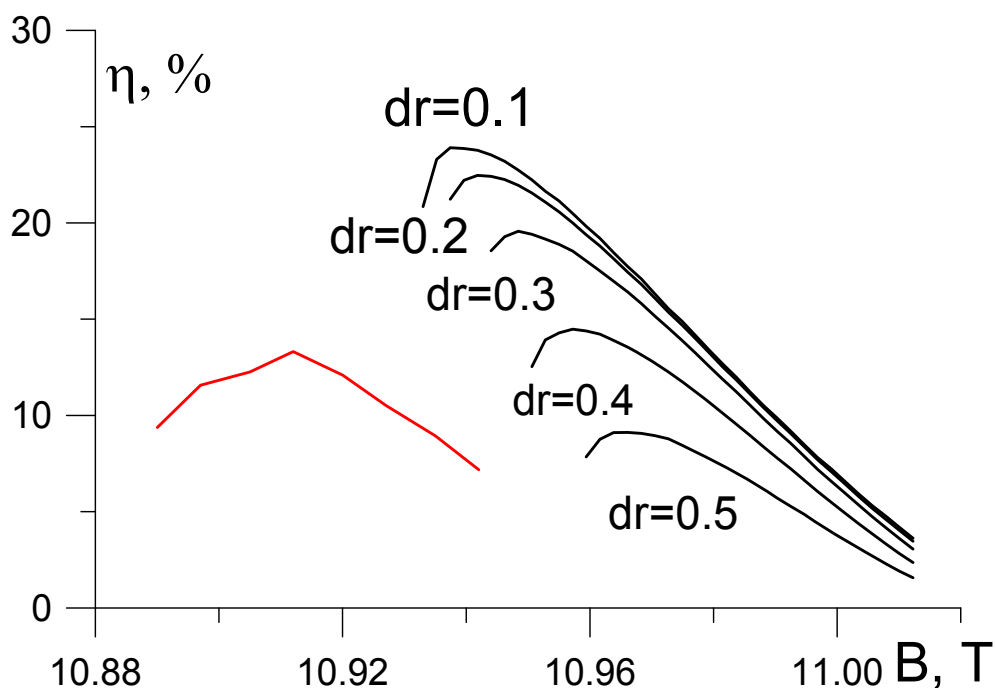


Рисунок 1.6 Расчетные зависимости выходного КПД в зависимости от перекоса пучка и экспериментальные результаты (красная линия слева)

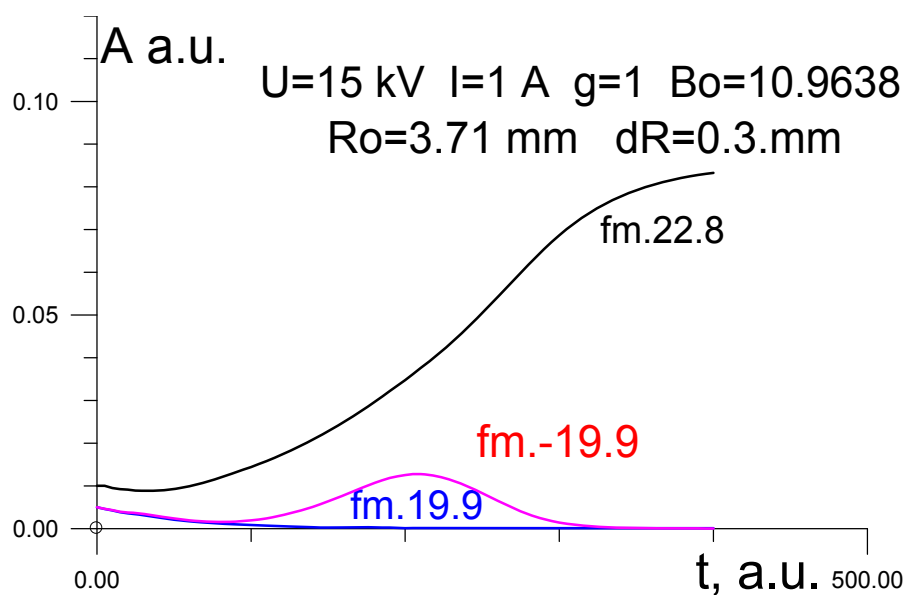


Рисунок 1.7 Временные зависимости амплитуд мод для 0.3 ТГц гиротрона при перекосе пучка 0.3 мм.

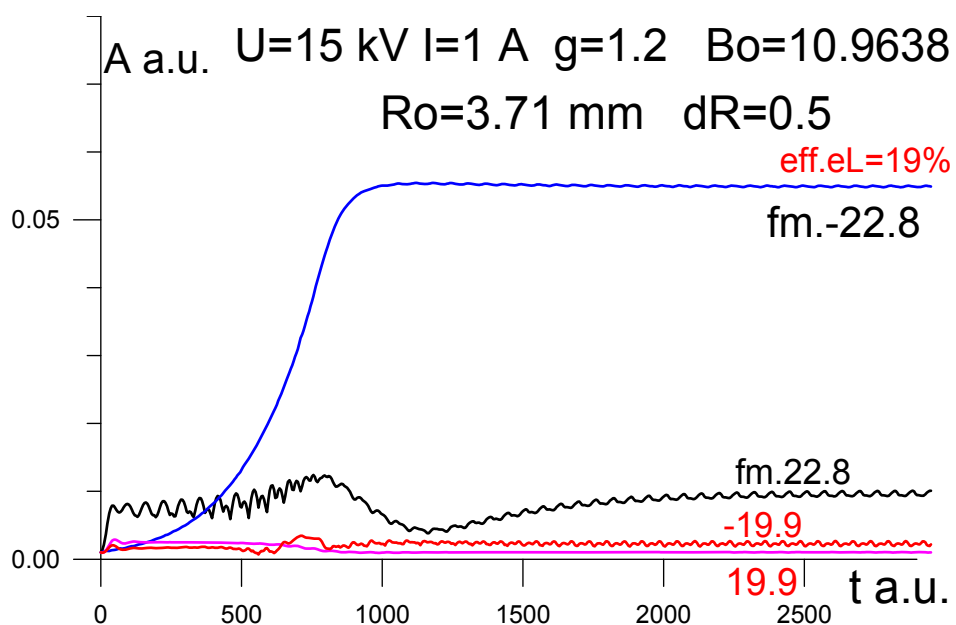


Рисунок 1.8. Временные зависимости четырехмодового взаимодействия при перекосе пучка 0.5 мм для гиротрона с частотой 0.3 ТГц

1.2.3 Численное моделирование режимов генерации в непрерывном гиротроне с частотами 0.25 ТГц и 0.28 ТГц

Следующим экспериментальным объектом, который был промоделирован численно, стал непрерывный гиротрон на второй гармонике гирочастоты. На нем в ходе экспериментов были исследованы два режима с частотами 0.25 ТГц и 0.28 ТГц⁷⁷.

В таблице 1.4 приведены основные параметры резонатора и электронного пучка, а также экспериментальные данные для обеих изучаемых мод данного гиротрона. Было проведено сопоставление экспериментальных данных и результатов численного моделирования для различных величин питч-фактора и разброса скоростей электронного пучка. Омические потери, так же, как и в предыдущих расчетах, высчитывались с использованием эмпирического коэффициента 0.5. На рисунке 1.9 приведены экспериментальные зависимости КПД и мощности излучения от тока электронного пучка для гиротрона на частоте 0.25 ТГц и моде $TE_{6,5}$ ⁷⁸. На том же рисунке приведены расчетные значения питч-фактора, для которых результаты численного моделирования соответствуют экспериментальным данным. Рассматривались идеализированная модель с моноскоростным пучком (без разброса скоростей) и модели с величиной относительного разброса поперечных скоростей электронов $\delta v_{\perp} = 0.3; 0.4$.

Дополнительно были проведены расчеты по модели с учетом высокочастотного (ВЧ) пространственного заряда электронного пучка. Данный эффект рассматривался в предположении, что разброс радиальных координат центров орбит электронов и ларморовский радиус малы по сравнению с радиусом пучка и длиной волны. Это позволило пренебречь неоднородностью группировки в радиальном и азимутальном направлении и рассматривать

⁷⁷ Глявин М.Ю., Гуртовник А.А., Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б. // В сб.: Гиротроны /ИПФ АН СССР. Горький, 1989. С.73-83.

⁷⁸ Там же

влияние пространственного заряда как взаимодействие плоских заряженных слоев^{79,80}.

Таблица 1.4 Основные параметры экспериментального гиротрона

| | | |
|---|------------|------------|
| Рабочая мода | $TE_{6,5}$ | $TE_{8,5}$ |
| Частота, ТГц | 0.25 | 0.28 |
| Радиус резонатора, мм | 4.185 | 4.185 |
| Оптимальный радиус электронного пучка, мм | 1.015 | 1.277 |
| Полная добротность резонатора | 5700 | 6700 |
| Омическая добротность | 15000 | 15500 |
| Ускоряющее напряжение, кВ | 18 | 18 |
| Максимальный ток пучка, А | 0.9 | 0.9 |
| КПД, % | 5.3 | 5.5 |
| Мощность, Вт | 850 | 890 |

На рисунке 1.9 штриховыми линиями показаны зависимости КПД от тока при учете пространственного заряда, $\delta v_{\perp} = 0; 0.3$ и расчетных значениях питч-фактора электронов. Из рисунок 1.10 видно, что при учете пространственного заряда КПД незначительно возрастает - это связано с «эффектом отрицательной массы»⁸¹: под действием сил пространственного заряда фазовая группировка электронного пучка становится более плотной. Влияние пространственного заряда незначительно, но стоит отметить, что в данном случае наблюдается эффект повышения КПД, а не понижения, вследствие того, что генерация производится при параметрах гиротрона, далеких от оптимальных по КПД

⁷⁹ Братман В.Л., Петелин М.И. // Изв. вузов. Радиофизика, 1975. Т.18. №10. С.1538-1543.

⁸⁰ Братман В.Л., Моисеев М.А., Петелин М.И., Эрм Р.Э. // Изв. вузов. Радиофизика, 1973. Т.16. №4. С.622-630.

⁸¹ Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., Postnikova A.S., Zapevalov V.E. // Int. J. Infrared and MM Waves, 1999. V.20. №3. P.361.

(более подробно об оптимизации параметров маломощных субтерагерцовых гиротронов будет рассказано в гл.2).

В целом представленные результаты не позволяют однозначно определить параметры электронного пучка, поскольку один и тот же КПД может быть достигнут при различных значениях разброса и питч-фактора. Более точная оценка параметров электронного пучка может быть выполнена с привлечением экспериментальных данных о возбуждении паразитных мод.

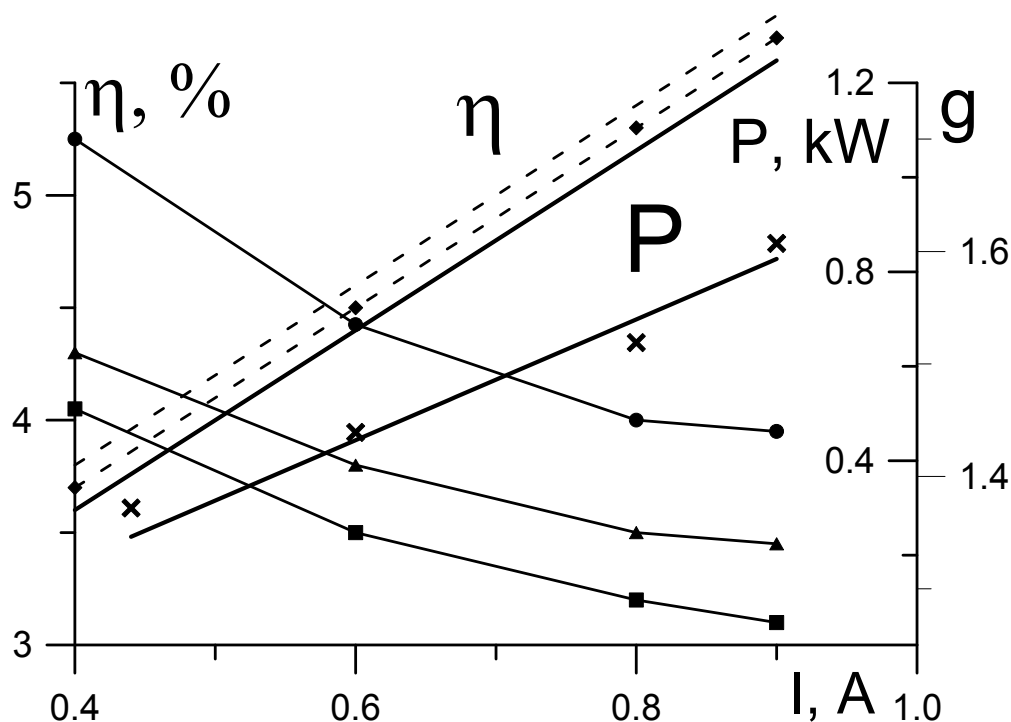


Рисунок 1.9. Экспериментальные зависимости КПД (η) и мощности излучения от тока для моды $TE_{6,5}$ (толстые линии), расчетные значения питч-фактора, для которых результаты численного моделирования совпадают с экспериментальными (тонкие линии: кружки - $\delta v_{\perp} = 0$, треугольники - $\delta v_{\perp} = 0.3$, квадраты - $\delta v_{\perp} = 0.4$). Штриховые линии – КПД с учетом пространственного заряда (с ромбиками при $\delta v_{\perp} = 0.3$, без - при $\delta v_{\perp} = 0$).

На рисунке 1.10 приведены данные калориметрического измерения выходной мощности в зависимости от магнитного поля соленоида для гиротрона с рабочей модой $TE_{6,5}$. Изрезанность кривых, по-видимому, связана с флуктуациями источников питания гиротрона, влиянием отражения части СВЧ

мощности от диэлектрического окна и калориметра, а также другими факторами.

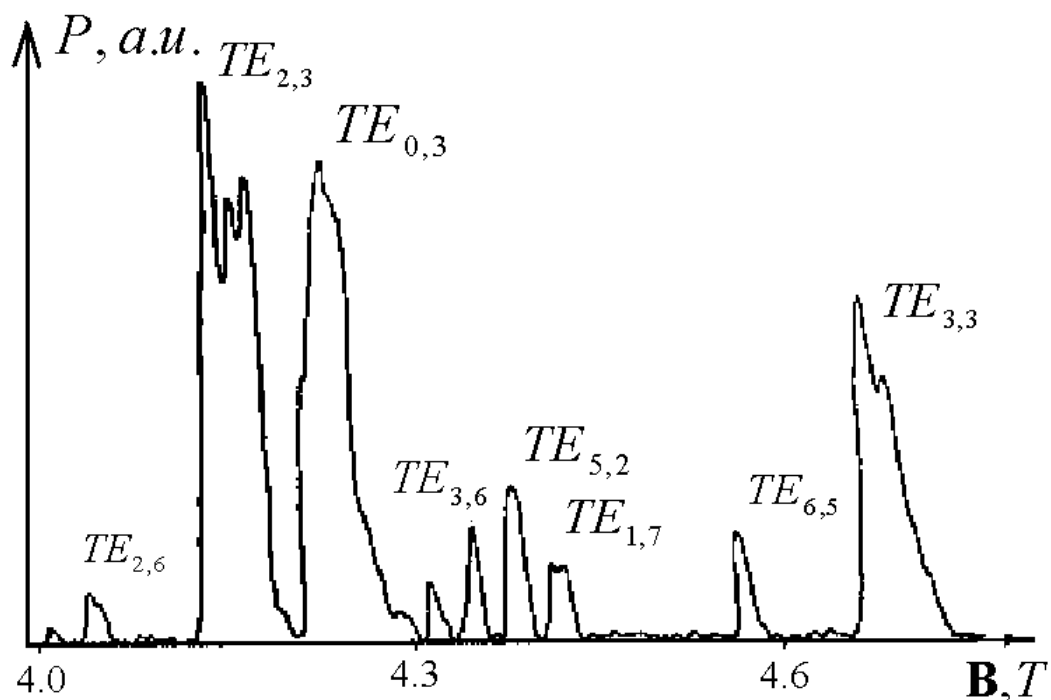


Рисунок 1.10. Экспериментальные зависимости мощности излучения от магнитного поля для моды $TE_{6,5}$ и соседних мод при токе $I = 0.9 \text{ A}$.

Из рисунка 1.10 видно, что существует зона устойчивой одномодовой генерации рабочей моды. Это подтверждается и численными расчетами стартовых токов паразитных мод в области генерации моды $TE_{6,5}$. На рисунке 1.11 приведены кривые расчетных значений стартовых токов паразитной моды $TE_{0,3}$ ($n=1$) и зона генерации рабочей моды. При рабочем токе $I = 0.9 \text{ A}$ паразитная мода $TE_{0,3}$ ($n=1$) не возбуждается при разбросе поперечных скоростей $\delta v_{\perp} = 0.3$. Осцилляции зависимости $I_{st}(B)$ при $B < 4.45 \text{ T}$ связаны с отражением мощности волны от входного закритического сужения резонатора и возбуждением колебаний с различным числом продольных вариаций ВЧ поля. При $B > 4.45 \text{ T}$ входное сужение перестает быть закритическим и мода $TE_{0,3}$ ($n=1$) возбуждается на встречной волне почти без отражения от входного сужения и осцилляций стартового тока $I_{st}(B)$. Расчеты

показывают, что в эксперименте разброс скоростей превышал значения 0,15–0,2. При этом величина питч-фактора примерно равна 1,3.

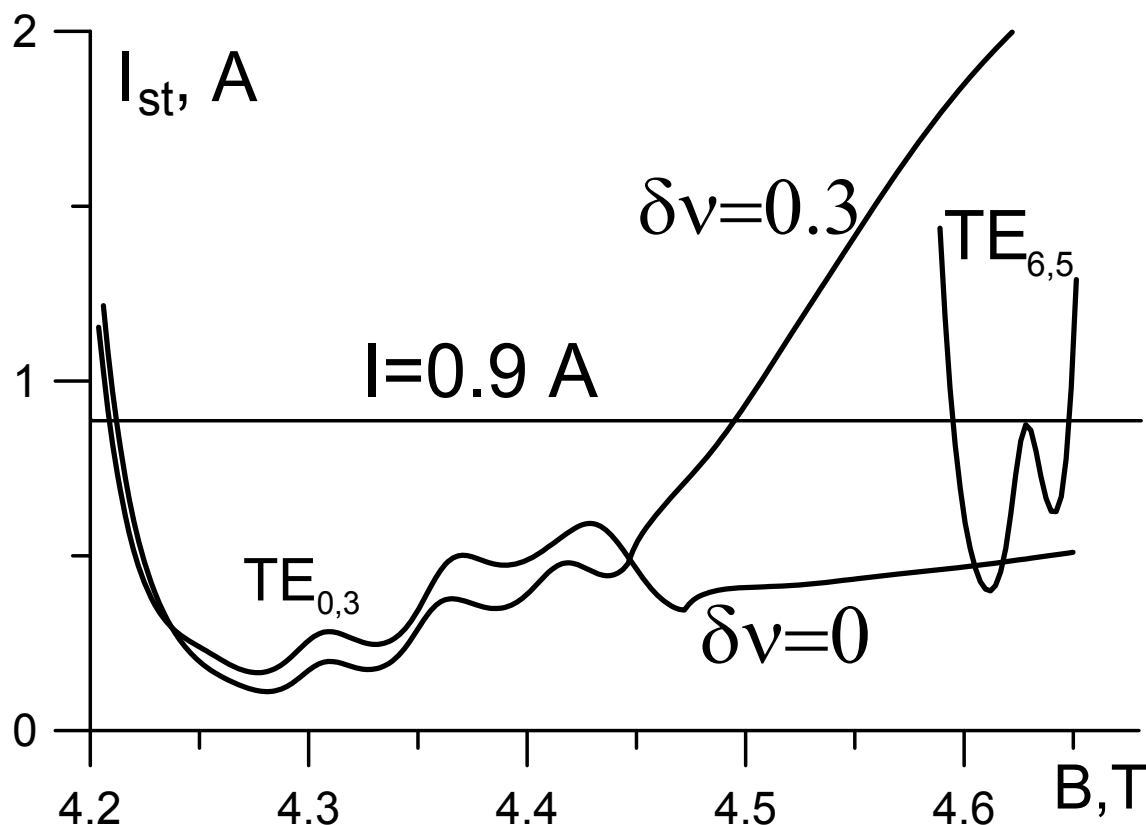


Рисунок 1.11. Расчетные зависимости стартовых токов (I_{st}) паразитной моды $TE_{0,3}$ без разброса скоростей и с разбросом $\delta v_{\perp} = 0.3$ и стартовый ток рабочей моды $TE_{6,5}$ от магнитного поля.

Численное моделирование зон стартовых токов и режимов генерации паразитных мод показало, что моды $TE_{3,6}$ и $TE_{1,7}$ имеют крайне низкий КПД, а мода $TE_{5,2}$ не возбуждается совсем при максимальном рабочем токе $I = 0.9 A$, в отличие от результатов эксперимента. Таким образом, для дальнейшего согласования расчетной модели необходим учет дополнительных факторов, которые могут привести к уменьшению стартовых токов указанных мод.

Одним из таких факторов является отражение сигнала от выходного окна, что приводит к повышению эффективной добротности системы, и,

следовательно, к уменьшению стартового тока. Коэффициент отражения вычисляется следующим образом⁸²:

$$r_w^2 = \frac{(1-\gamma)^2 \sin^2 \chi}{4\gamma \cos^2 \chi + (1+\gamma)^2 \sin^2 \chi} \quad (1.9)$$

где $\chi = \frac{\omega \cdot d_w}{c} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}$, $\gamma = \frac{\varepsilon - \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}$, ε и d_w – диэлектрическая проницаемость и толщина окна, соответственно, θ – бриллюеновский угол волны в выходном волноводе, ω – частота генерации. В эксперименте использовалось окно из кварцевого стекла толщиной $d_w = 1.23$ мм и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon \approx 3.8$. В расчетах наличие окна моделировалось с помощью сужения в выходном волноводе гиротрона. Величина сужения подбиралась таким образом, чтобы при решении холодной задачи структура волны в выходном волноводе соответствовала решению задачи при отражении излучения от окна с описанными выше параметрами. Как видно из расчетов такой системы (см. таблицу 1.5), отражение от окна снижает стартовые токи паразитных мод, однако этого недостаточно для возбуждения наблюдавшейся в эксперименте моды $TE_{5,2}$.

Выше предполагалось, что радиус электронного пучка R_0 равен оптимальному для рабочей моды $TE_{6,5}$, что соответствует максимуму структурного G_{mp} - фактора. При малом изменении радиуса электронного пучка G_{mp} - фактор и, соответственно, КПД рабочей моды меняются слабо, тогда, как G_{mp} - фактор и стартовый ток паразитной моды, для которой радиус пучка далек от оптимального, могут измениться значительно. Данным эффектом можно объяснить возбуждение моды $TE_{5,2}$. При оптимальном для рабочей моды радиусе электронного пучка мода $TE_{5,2}$ имеет очень малый G_{mp} - фактор, в 40 раз

⁸² G.G. Denisov, D.A. Lukovnikov, W. Kasparek, D. Wagner // Int. J. Infrared and MM Waves, 1996. V.17. №5. P.933.

меньше, чем для мод $TE_{0,3}$ и $TE_{3,3}$ ($n = 1$). При $R_0 = 1,1$ мм G_{mp} - фактор моды $TE_{5,2}$ возрастает вдвое, соответственно вдвое уменьшается ее стартовый ток.

Существенное влияние на величину стартовых токов паразитных мод оказывает изменение питч-фактора электронов в зависимости от величины магнитного поля соленоида. Согласно адиабатической теории МИП относительные скорости вращательного β_{\perp} и поступательного β_{\parallel} движения электронов в резонаторе определяются выражениями⁸³:

$$\beta_{\perp} = \frac{E_k}{B_k} \left(\frac{B_0}{B_k} \right)^{1/2} \cos(\varphi), \quad \beta_{\parallel} = (\beta^2 - \beta_{\perp}^2)^{1/2} \quad (1.10)$$

где B_0 и B_k - величины статического магнитного поля в резонаторе и на катоде (в области эмитирующего пояска), E_k - напряженность электрического поля на катоде, φ - угол наклона магнитной силовой линии к поверхности эмиттера, β - полная скорость электрона, нормированная на скорость света.

В таблице 1.5 приведены значения питч-фактора электронов при величинах магнитного поля в резонаторе, соответствующих максимуму КПД указанных в таблице мод, и их стартовые токи с учетом всех приведенных выше факторов. Для моды $TE_{0,3}$ ($n = 1$) случай (а) соответствует минимуму стартового тока, случай (б) - зоне генерации $TE_{6,5}$.

Результаты расчетов (рисунок 1.12), учитывающие отражение сигнала от окна, неоптимальность R_0 и изменение питч-фактора электронов, показывают, что для мод, резонансных со второй гармоникой гирочастоты ($n=2$) КПД и мощность составляют соответственно $\eta = 5 - 6\%$ и $P = 0.8 - 1$ кВт, а КПД и мощность мод на первой гармонике ($n=1$) достигают $\eta = 35 - 40\%$ и $P = 5 - 6$ кВт, в полном согласии с экспериментом.

⁸³ Sh.E. Tsimring *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics* // Published by John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2007

Из более высоких рабочих мод в рассматриваемом гиротроне сравнительно редкий спектр паразитных мод имеет мода $TE_{8,5}$, обеспечивающая генерацию колебаний на частоте 0.28 ТГц. На рисунке 1.13 изображены экспериментальные зависимости выходной мощности от магнитного поля соленоида в окрестности моды $TE_{8,5}$ ⁸⁴.

Таблица 1.5. Учет дополнительных факторов на стартовые токи мод в окрестностях рабочей моды $TE_{6,5}$

| мода | $TE_{6,5}$ | $TE_{3,6}$ | $TE_{1,7}$ | $TE_{0,3}$ (а) | $TE_{0,3}$ (б) | $TE_{3,3}$ | $TE_{5,2}$ |
|--|------------|------------|------------|----------------|----------------|------------|------------|
| Частота, ТГц | 0.25015 | 0.23911 | 0.24130 | 0.11999 | 0.12358 | 0.12936 | 0.11994 |
| $I_{st}(r_w = 0), A$ | 0.41 | 0.67 | 0.65 | 0.09 | 1.96 | 0.08 | 3.11 |
| Учет отражения сигнала от выходного окна. | | | | | | | |
| r_w | 0.13 | 0.45 | 0.40 | 0.33 | 0.12 | 0.10 | 0.24 |
| $I_{st}(r_w \neq 0), A$ | 0.37 | 0.45 | 0.44 | 0.06 | 1.85 | 0.06 | 2.37 |
| Учет отражения от окна, изменения радиуса пучка и изменения питч-фактора | | | | | | | |
| g | 1.35 | 1.53 | 1.46 | 1.6 | 1.35 | 1.26 | 1.52 |
| I_{st}, A | 0.41 | 0.22 | 0.58 | 0.06 | 1.47 | 0.07 | 0.49 |

Для лучшего соответствия расчетных и экспериментальных данных учтем изменение питч-фактора электрона в зависимости от магнитного поля и возможное отклонение радиуса ведущих центров электронных орбит от оптимального значения ($R_0 = 1.32$ мм). В таблице 1.6 приведены стартовые токи с учетом указанных факторов. Для моды $TE_{-1,4}$ ($n = 1$) случай (а) соответствует значению магнитного поля, при котором достигается минимум ее стартового тока; случай (б) – магнитному полю в зоне генерации моды $TE_{8,5}$.

⁸⁴ Глявин М.Ю., Гуртовник А.А., Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б. // В сб.: Гиротроны ИПФ АН СССР. Горький, 1989. С.73-83.

На рисунке 1.14 приведены расчетные зависимости КПД для моды $TE_{8,5}$ и ближайших к ней мод от магнитного поля с учетом всех перечисленных выше факторов. Так же как и для моды $TE_{6,5}$ наблюдается соответствие с экспериментом для всех мод. Так как стартовый ток моды $TE_{-1,4}$ ($n = 1$) в пределах зоны генерации моды $TE_{8,5}$ меньше рабочего тока, необходимо исследовать процесс нелинейного взаимодействия мод.

Нелинейное взаимодействие рабочей моды $TE_{8,5}$ и паразитной моды $TE_{-1,4}$ ($n = 1$) рассчитывалось для различных величин δv_{\perp} с помощью многомодовой нестационарной модели с самосогласованной структурой ВЧ поля, описываемой в п.1.2, в которую были включены все рассматриваемые факторы. Из результатов численного моделирования следует, что мода $TE_{-1,4}$ подавляется модой $TE_{8,5}$ в зоне генерации $TE_{8,5}$ при $\delta v_{\perp} \geq 0.3$. На рисунке 1.15 показана динамика установления режима генерации в виде временных зависимостей безразмерных амплитуд ($A, a.u.$) мод при конкуренции мод $TE_{8,5}$ и $TE_{-1,4}$ для значений скоростного разброса $\delta v_{\perp} = 0; 0.3$. Из анализа результатов можно сделать вывод, что относительная величина разброса поперечных скоростей электронов в экспериментальном гиротроне была не меньше 0.3.

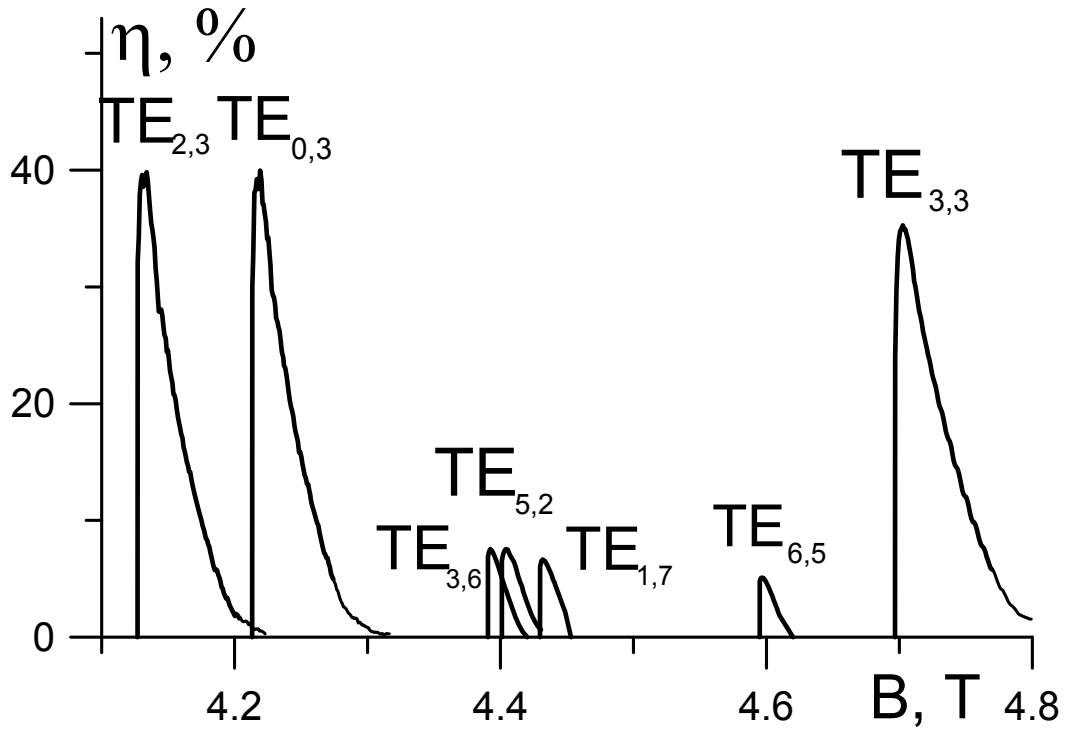


Рисунок 1.12 Расчетные зависимости КПД излучения от магнитного поля для моды $TE_{6,5}$ и соседних мод при токе $I = 0.9$ А с учетом отражения от выходного окна, изменения радиуса электронного пучка и изменения питч-фактора.

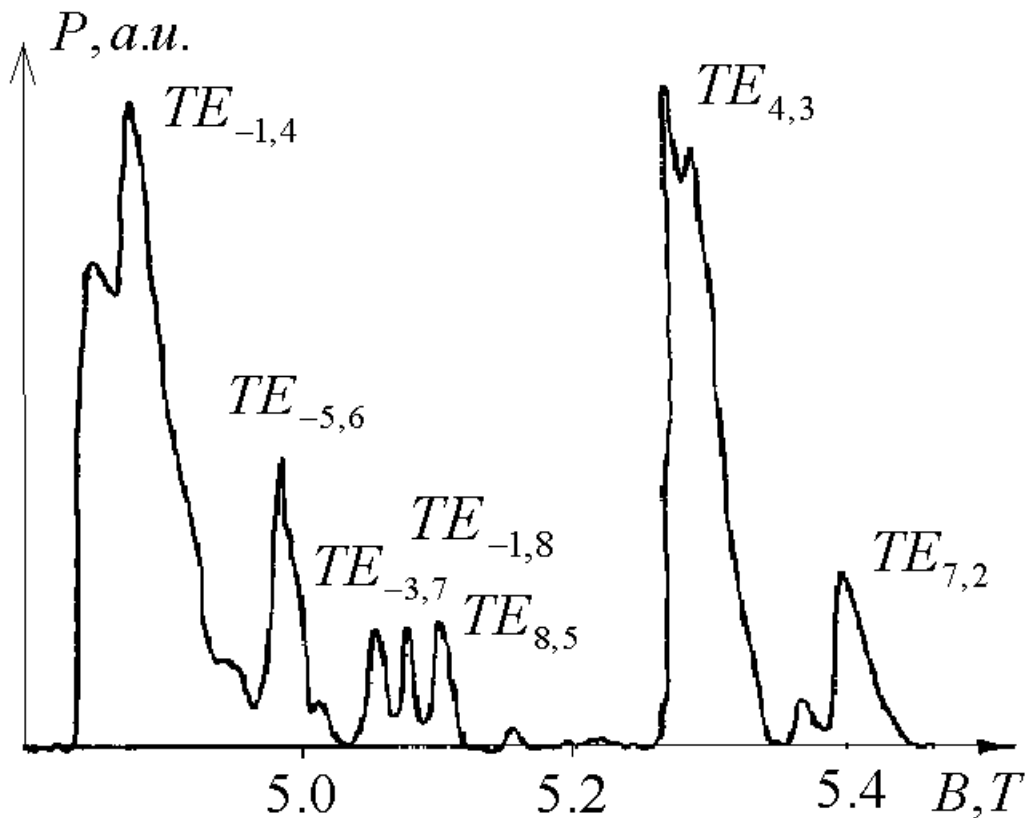


Рисунок 1.13 Экспериментальные зависимости мощности излучения (в условных единицах) от магнитного поля для моды $TE_{8,5}$ и соседних мод при токе $I = 0.9$ А.

Таблица 1.6. Учет дополнительных факторов на стартовые токи мод в окрестностях рабочей моды $TE_{8,5}$

| Мода | $TE_{8,5}$ | $TE_{-5,6}$ | $TE_{-3,7}$ | $TE_{-1,4}(a)$ | $TE_{-1,4}(б)$ | $TE_{-1,8}$ | $TE_{4,3}$ |
|--|------------|-------------|-------------|----------------|----------------|-------------|------------|
| Частота, ТГц | 0.28042 | 0.27148 | 0.27537 | 0.13346 | 0.13668 | 0.27727 | 0.14473 |
| $I_{st}(r_w=0), A$ | 0.39 | 0.77 | 0.55 | 0.09 | 0.92 | 0.82 | 0.07 |
| Учет отражения сигнала от выходного окна. | | | | | | | |
| r_w | 0.60 | 0.51 | 0.56 | 0.24 | 0.34 | 0.58 | 0.51 |
| $I_{st}(r_w \neq 0), A$ | 0.24 | 0.51 | 0.32 | 0.04 | 0.60 | 0.5 | 0.05 |
| Учет отражения от окна, изменения радиуса пучка и изменения питч-фактора | | | | | | | |
| g | 1.35 | 1.5 | 1.43 | 1.6 | 1.35 | 1.39 | 1.29 |
| I_{st}, A | 0.23 | 0.27 | 0.38 | 0.03 | 0.66 | 0.37 | 0.06 |

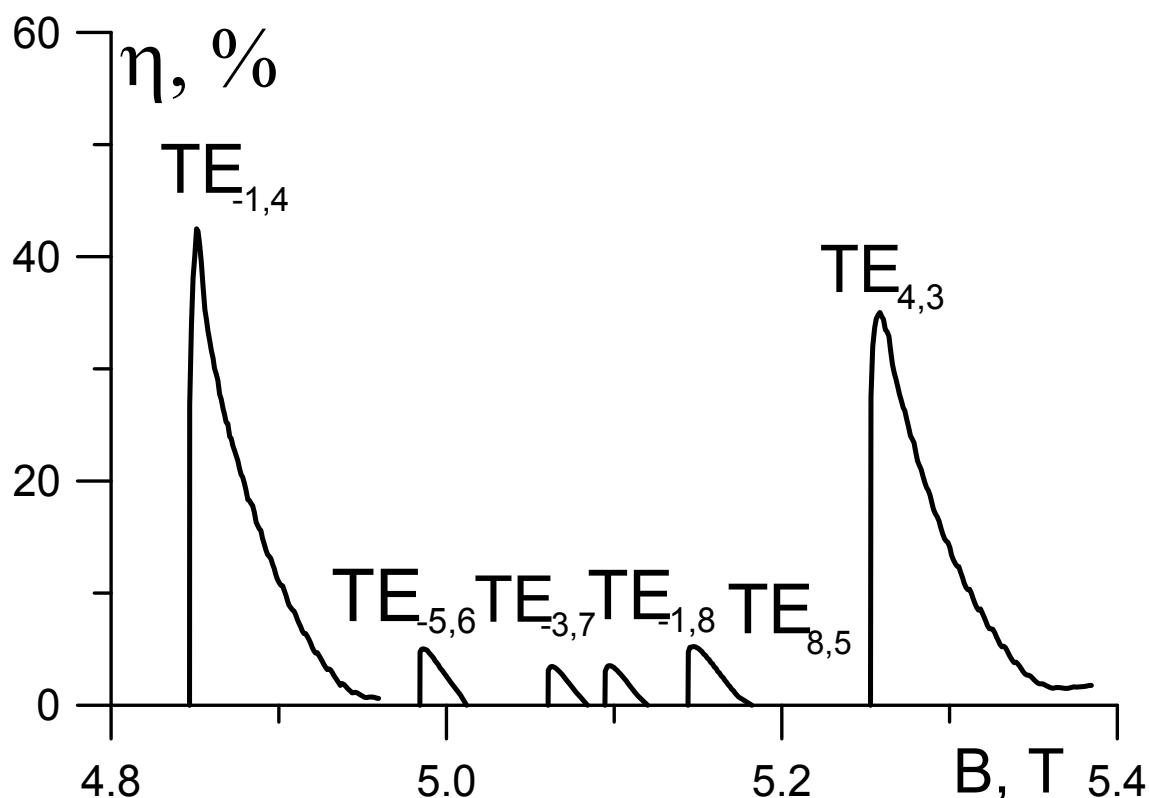


Рисунок 1.14. Расчетные зависимости КПД от магнитного поля для рабочей $TE_{8,5}$ моды и соседних с ней паразитных мод при токе 0.9 А.

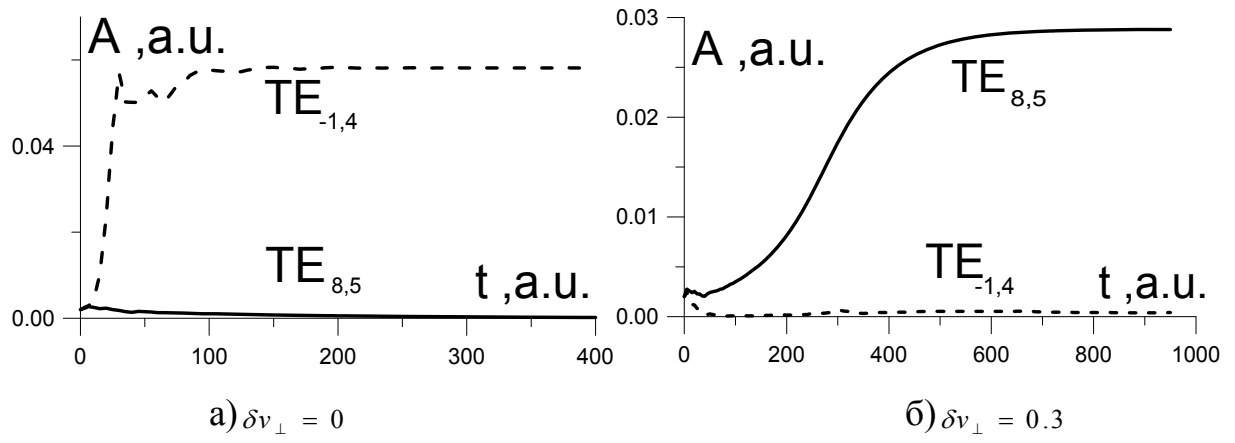


Рисунок 1.15 Временная динамика взаимодействия мод $TE_{8,5}$ и $TE_{-1,4}$ при различных относительных разбросах поперечных скоростей электронов (ток $I = 0.9$ А).

Заключение.

В начале главы проведен обзор современного состояния исследований, связанных с разработкой и созданием терагерцевых источников излучения мощностью 10-1000 Вт. Показано, что во многих научных центрах ведется активная разработка электровакуумных источников терагерцевого излучения, а также поиск и освоение новых приложений для этих источников. При этом основным видом таких источников в настоящий момент являются гиротроны.

После описания расчетных моделей которые были затем использованы при численном моделировании гиротронов, приводятся результаты расчетов режимов генерации нескольких приборов в диапазоне частот 0.25-0.315 ТГц, которые уже были созданы и испытаны ранее. На основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных оценены параметры электронного пучка в резонаторе. Полученные значения питч-факторов (1.3-1.5) и относительных разбросов поперечных скоростей (0.3-0.4) для электронных пучков данных гиротронов соответствуют результатам электронно-оптических расчетов МИП и близки к экспериментально полученным значениям для МИП гиротронов коротковолновой части миллиметрового диапазона на первой гармонике гирочастоты. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности использования эмпирического коэффициента 0.5 для расчета омической добротности резонаторов.

Исследование зон генерации как рабочей, так и паразитных мод позволило исследовать такие факторы, как отклонение радиуса электронного пучка от оптимального значения, влияние пространственного заряда электронного пучка, отражение волн от выходного окна, несоосность электронного пучка и оси криомагнита.

При учете указанных выше эффектов можно добиться хорошего соответствия между результатами экспериментов и результатами численного моделирования. Полученные подходы и результаты были использованы для проектировки и оптимизации маломощных субтерагерцевых и терагерцевых гиротронов, описанных в следующих главах диссертации.

Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Как уже отмечалось в первой главе, существует целый ряд современных приложений, для которых необходимы источники когерентного относительно маломощного (10-1000 Вт) непрерывного излучения с частотой 0.2-2 ТГц. Кроме требований к определенному уровню мощности и частоты излучения на данные приборы, как правило, накладываются дополнительные условия, обусловленные спецификой приложения такие как, например, высокая стабильность и возможность перестройки выходных параметров в относительно широких пределах.

Данная глава посвящена как оптимизации гиротронов с относительно простыми электродинамическими системами в виде участка цилиндрического волновода⁸⁵⁸⁶, так и анализу гиротронов с более сложными видами электродинамических систем⁸⁷⁸⁸⁸⁹.

⁸⁵ *Glyavin M.Yu., Zavolskiy N.A., Sedov A.S., Nusinovich G.S.* Low-Voltage Gyrotrons // *Physics of Plasmas*, 2013 №20, 033103:1-7.

⁸⁶ *Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Седов А.С., Пу Р., Нусинович Г.С., Гранаштейн В.Л.* Разработка мощного импульсного субтерагерцового гиротрона для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, 2011, Т.54, №8-9, С.666-675.

⁸⁷ *М. Ю. Глявин, Г. Г. Денисов, В. Е. Запечалов, А. Н. Куфтин, А. Г. Лучинин, В. Н. Мануилов, М. В. Морозкин, А. С. Седов, А. В. Чирков* Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы // *Радиотехника и электроника*, 2014, Т. 59, № 8, С. 745–751.

⁸⁸ *Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Широкополосная перестройка частоты в гиротроне с использованием режима giro-ЛОВ // *Тезисы докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн* Н. Новгород, 2011, С.56.

⁸⁹ *Завольский Н.А., Петелин М.И., Седов А.С., Фильченков С.Е.* Селекция мод в гиротроне субмиллиметрового диапазона с гофрированной стенкой резонатора // *XIV Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики"*, Звенигород, 2012, С.213-214.

2.1 Оптимизация гиротрона для работы в режимах с малым ускоряющим напряжением.

2.1.1 Аналитические и простейшие численные оценки для оптимизации параметров резонатора субтерагерцовых гиротронов.

Главным отличием оптимизации маломощных терагерцовых гиротронов от мощных гиротронов для УТС или гиротронов для технологических приложений является наличие существенных омических потерь. Обычно для первоначальной оценки оптимальных параметров мощных гиротронов используются высчитанные изолинии КПД на плоскостях приведенный ток и приведенная длина.⁹⁰

Для получения этих результатов решается система уравнений, включающая в себя уравнение движения электронов в ВЧ-поле

$$\frac{dp}{d\zeta} + i(\Delta + |p|^2 - 1)p = iFf(\zeta) \quad (2.1)$$

где p - приведенный импульс электрона, $\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left(1 - \frac{n\omega_H}{\omega} \left(1 - \frac{\beta_{\perp}^2}{2} - \frac{\beta_{\parallel}^2}{2} \right) \right)$ - расстройка циклотронного резонанса, $f(\zeta)$ - нормированное продольное распределение ВЧ-поля, F - амплитуда ВЧ-поля, ζ - приведенная продольная координата, связанная с реальной координатой z соотношением, $\zeta = \pi g \beta_{\perp} (z/\lambda)$. Приведенная общая длина резонатора, называемая так же параметром неизохронности, при этом равна $\mu = \pi g \beta_{\perp} (L/\lambda)$.

Начальные условия для данного уравнения $p(\zeta_n) = e^{i\theta_0}$, где θ_0 - начальная фаза влета электрона относительно поля. Решив данное уравнение для всех возможных значений данной фазы, можно получить выражение для поперечного КПД гиротрона

$$\eta_{\perp} = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |p(\mu)|^2 d\theta_0 \quad (2.2)$$

⁹⁰ Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. // Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ, 1972. №8. С.55.

Данное уравнение дополняется уравнением баланса мощностей, которое связывает поперечный КПД, амплитуду поля и параметр тока I_0 .

$$F^2 = \hat{I} \mu \eta_{\perp} \quad (2.3)$$

Параметр тока вычисляется по следующей формуле $I_0 = 0.96 \cdot 10^{-3} I(A) G_{mp} K \frac{\beta_z}{\gamma_0 \beta_{\perp}^{2(4-s)}}$, где K - отношение добротности резонатора к минимальной дифракционной добротности $Q_{\min dif} = 4\pi \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2$ ⁹¹ (обычно определяется углом раскрыва коллекторного расширения резонатора).

Совместное решение уравнений (2.1-2.3) дает искомые зависимости поперечного КПД от параметра тока и параметра длины резонатора (при этом параметр расстройки циклотронного резонанса оптимизируется для максимизации поперечного КПД).

В рассматриваемом же случае терагерцовых маломощных гиротронов мы должны оптимизировать систему с точки зрения достижения максимальной мощности в условиях больших омических потерь в резонаторе и вынуждены вводить еще один независимый параметр, характеризующий величину этих потерь. Уравнение баланса будет в таком случае выглядеть следующим образом:

$$F^2 = \hat{I} \frac{\mu}{1 + Q_{dif}/Q_{ohm}} \eta_{\perp} \quad (2.4)$$

В такой постановке удобно ввести параметр, отвечающий за омические потери $D = \left(\frac{4}{\pi g^2 \beta_{\perp}^2}\right) K Q_{ohm}^{-1}$. Уравнение баланса в таком случае будет выглядеть так:

$$F^2 = \hat{I} \frac{\mu}{1 + D\mu^2} \eta_{\perp} \quad (2.5)$$

⁹¹ Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М. и др. Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1969. Т.12. №6. С.1236.

Процесс оптимизации изменился при этом следующим образом: для каждого значения параметра тока и параметра потерь D варьировались значения расстройки циклотронного резонанса и параметра длины с целью достижения максимального поперечного КПД с учетом омических потерь $\eta_{\perp}' = \left(1 - \frac{Q}{Q_{ohm}}\right) \eta_{\perp}$.

Получившиеся результаты приведены на рисунке 2.1 для различных гармоник гирочастоты. На данных плоскостях были также нанесены соответствующие линии оптимальной длины и оптимальных отношений дифракционной и омической добротностей. Эти плоскости были в дальнейшем успешно использованы в качестве оценок и первого приближения для более сложного моделирования гиротронов.

В случае относительно небольшой величины параметра тока можно попробовать получить довольно простые аналитические оценки для выбора параметров резонатора. Для этого рассмотрим простую модель электронно-волнового взаимодействия с фиксированной структурой ВЧ-поля виде гауссой кривой. При малом изменении энергии электронов уравнение движения электронов сводится к уравнению нелинейного маятника, и после его интегрирования, можно получить следующую формулу для оценки выходного КПД гиротрона⁹²:

$$\eta = \frac{\hat{I}}{1 + \hat{Q}} \frac{g^2}{1 + g^2} \sqrt{F} \hat{\eta}(\xi) \quad (2.6)$$

В данном выражении $\hat{Q} = \frac{Q_{dif}}{Q_{ohm}}$ - отношение дифракционной и омической добротностей, F - нормированная амплитуда ВЧ-поля в резонаторе, $\hat{I} = 0.06 \cdot 10^{-3} \pi \frac{\beta_{\perp}^{2(n-2)}}{\beta_{\parallel}} I \cdot G_{mp} \cdot Q_{ohm}$ - нормированный ток электронного пучка, ξ - приведенная длина, которая равна $\xi = \sqrt{F} \mu$.

⁹² Нусинович Г.С. Панкратова Т.Б. Теория гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн // В сб.: Гиротроны ИПФ АН СССР. Горький, 1981. С.169-182.

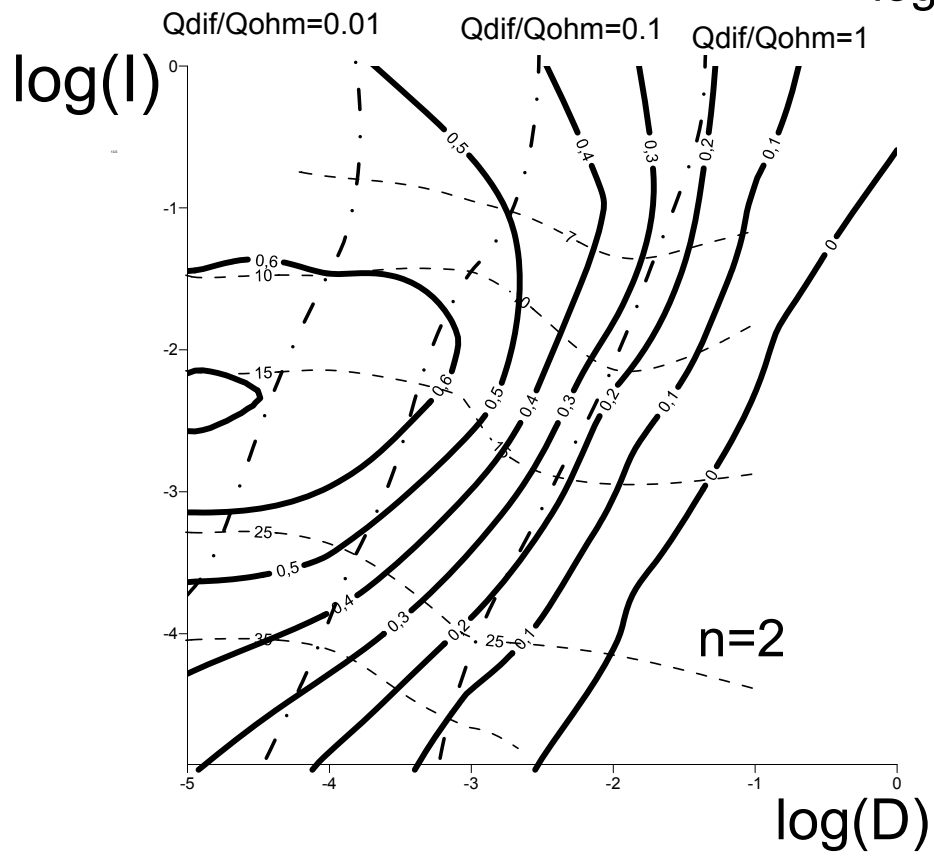
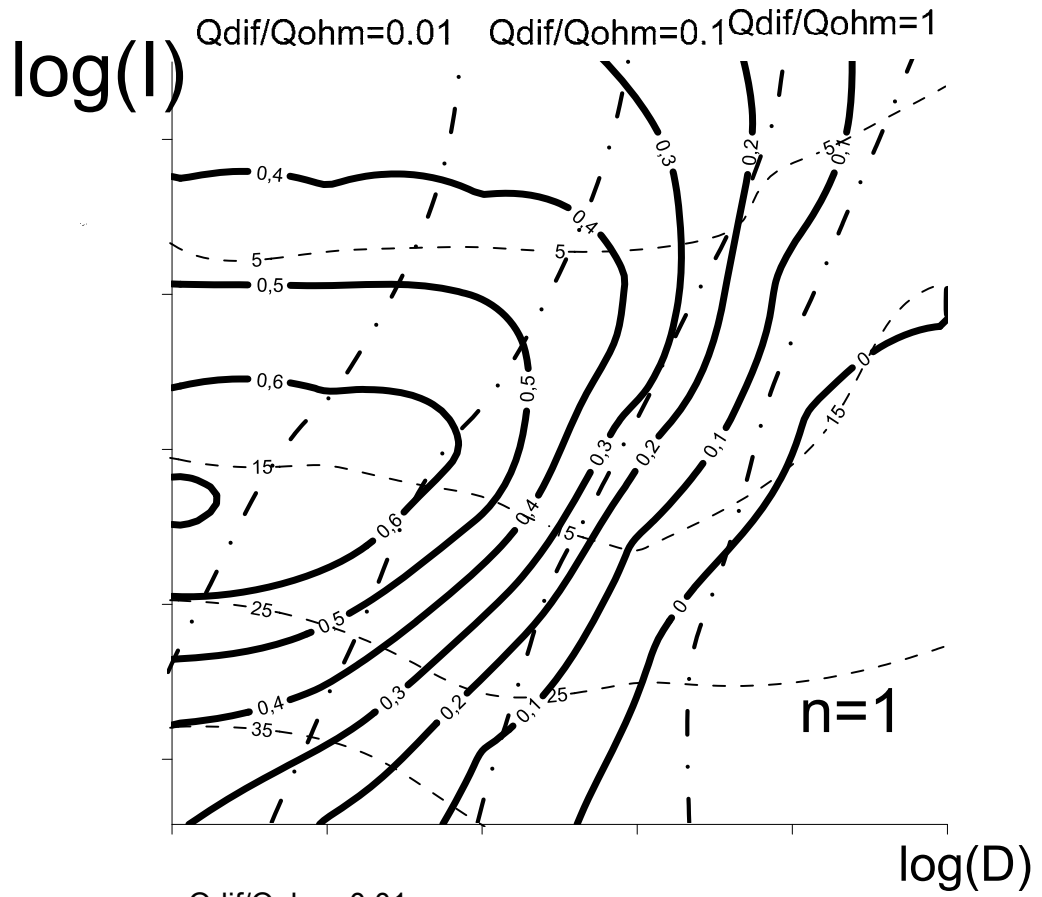
График функции $\hat{\eta}(\xi)$ изображен на рисунке 2.2. Эту функцию удобно аппроксимировать следующей формулой $\hat{\eta}(\xi) = \frac{\alpha \cdot \xi^3}{1 + \beta \cdot \xi^2 + \gamma \cdot \xi^4}$. Данная аппроксимация хорошо отражает характеристики основных участков $\hat{\eta}(\xi)$: кубическая зависимость при малых КПД, наличие максимума при $\xi_k \cong 3$ и постепенное спадание при больших длинах. Подобранные параметры аппроксимации составили $\alpha = 0.7$, $\beta = 0.4$, $\gamma = 0.08$.

Ранее при проектировании субмиллиметровых гиротронов считалось, что длина цилиндрической части резонатора и отношение добротностей независимы⁹³. В таком случае переменные в выражении (2.6) разделяются, и максимизировав его, можно получить оптимальное отношение для добротностей $\hat{Q} = 1/2$. Данное отношение, в частности, использовалось для проектирования гиротрона на частоте 0.315 ТГц⁹⁴, который был рассмотрен в предыдущей главе.

При дальнейшем продвижении в терагерцовый диапазон (что приводит к снижению омической добротности) или при уменьшении величин параметров пучка (ток, питч-фактор и напряжение) может оказаться, что после применения полученных формул соответствующая оптимальной длине дифракционная добротность будет выше минимальной дифракционной, то есть параметры длины и добротности уже нельзя считать независимыми и необходимо оптимизировать резонатор для достижения минимальной из возможных добротностей. Ниже мы попытаемся получить общую аналитическую оценку.

⁹³ Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б. Теория гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн // В сб.: Гиротроны ИПФ АН СССР. Горький, 1981. С.169-182

⁹⁴ Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А. // Радиотехника и электроника, 1974, Т.19, №5, С.1056-1060.



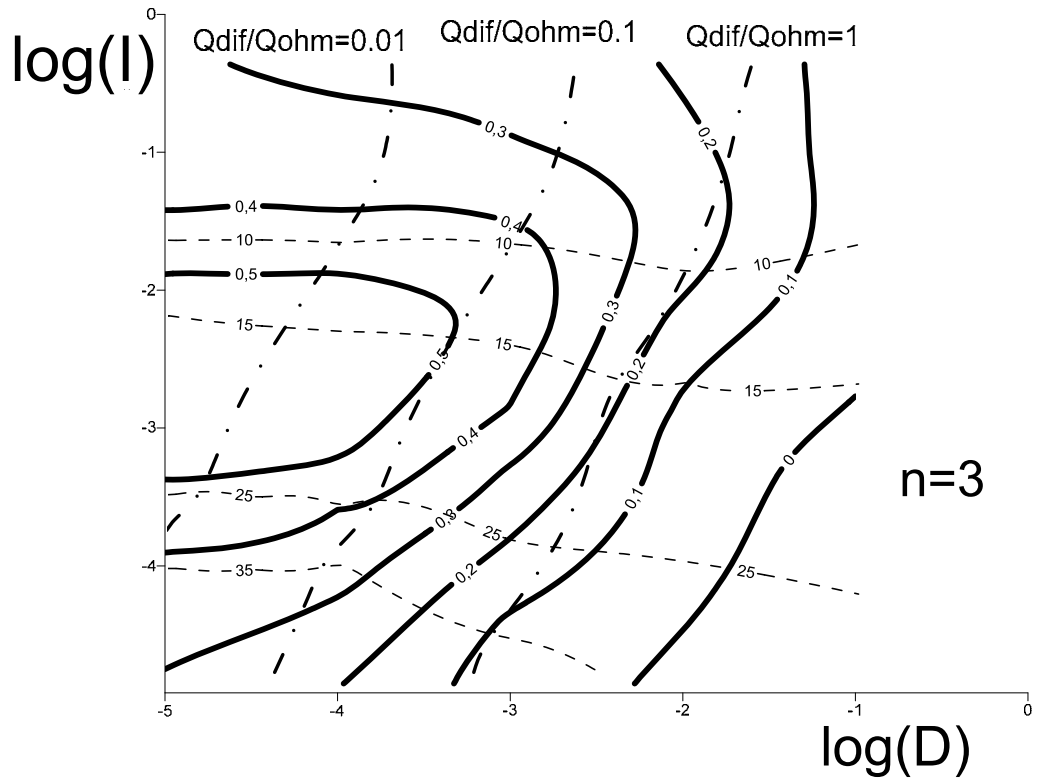


Рисунок 2.1 Изолинии максимального КПД (сплошные линии) и соответствующие им оптимальное соотношение добротностей (штрихпунктирные линии) и параметра неизохронности (пунктирные линии) в зависимости от параметров тока и омических потерь для гиротронов работающих на различных гирогармониках.

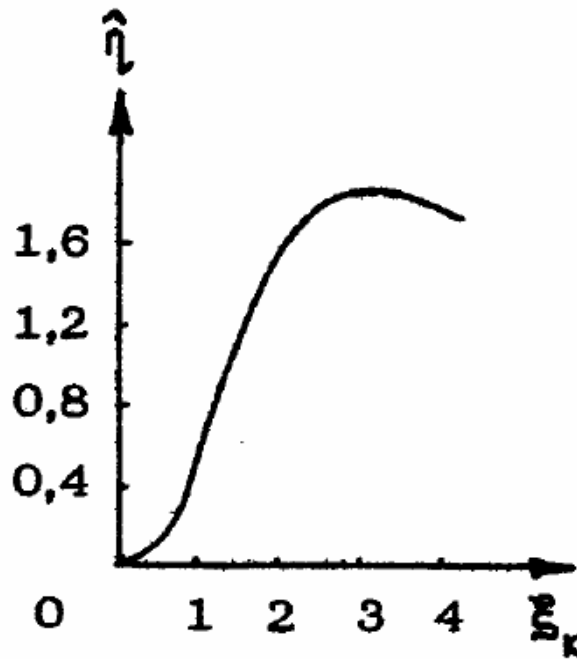


Рисунок 2.2 Зависимость приведенного КПД от приведенной длины резонатора для фиксированной структуры ВЧ-поля

Выражение для отношений добротности \hat{Q} запишем в следующем виде:
 $\hat{Q} = CK\mu^2$, где $C = \frac{4}{\pi} \beta_{\parallel}^2 \beta_{\perp}^{-4} Q_{ohm}^{-1}$. Параметры K и μ в данной постановке задачи являются независимыми и $K > 2$. При этом выражение (2.6) преобразуется к виду

$$\eta = \frac{(\sqrt{\beta^2 + 4 \cdot \gamma (\frac{\alpha \hat{I} CK \mu^4}{1 + CK \mu^2} - 1) - \beta})^2}{4 \cdot \gamma^2 \cdot C \cdot \hat{I} \cdot K \cdot \mu^5} \frac{g^2}{1 + g^2}. \quad (2.7)$$

Чтобы найти максимум выходного КПД нужно продифференцировать выражение (2.4) по параметрам μ и K и приравнять получившиеся производные к нулю. В результате получается два уравнения

$$-5(\sqrt{\beta^2 + 4\gamma(y-1)} - \beta) + \frac{8\gamma y(2-f)}{\sqrt{\beta^2 + 4\gamma(y-1)}} = 0 \quad (2.8a)$$

$$-(\sqrt{\beta^2 + 4\gamma(y-1)} - \beta) + \frac{2\gamma y(1-f)}{\sqrt{\beta^2 + 4\gamma(y-1)}} = 0 \quad (2.8b)$$

где $y = \alpha \hat{I} \frac{CK\mu^4}{1 + CK\mu^2}$, $f = \frac{CK\mu^2}{1 + CK\mu^2}$. Решая систему, находим $f = 1/3$ или

$$\frac{Q_{dif}}{Q_{ohm}} = 1/2.$$

Однако, как было сказано выше, найденное значение K может оказаться таким, что $K < K_{\min} = 2$, то есть нереализуемым на практике. В данном случае следует положить дифракционную добротность минимальной из технологически реализуемых и численно решать первое уравнение относительно μ , затем подставлять полученное значение в выражение для КПД (2.4).

Ниже мы рассмотрим достаточно важный для практики случай, когда омические потери в резонаторе представляют большую часть энергии, отбираемой у пучка в результате электронно-волнового взаимодействия, что соответствует случаю $CK\mu^2 \gg 1$. При этом, решая уравнение (2.8a), можно получить приближительное выражение для оптимального параметра неизохронности

$$y = \alpha \hat{I} \frac{CK\mu^4}{1 + CK\mu^2} = 2.5 \quad (2.9)$$

и максимального КПД:

$$\eta = \frac{0.24 \hat{I}^{3/2}}{C \cdot K} \frac{g^2}{1 + g^2} \quad (2.10)$$

Полученные оценки достаточно хорошо согласуются с результатами численного моделирования ряда маломощных гиротронов, которые будут далее приведены в диссертации в п. 2.1.2.

Стоит отметить, что изложенная теория не учитывает эффекта, связанного с тем, что при уменьшении дифракционной добротности при фиксированной длине, нам фактически приходится уменьшать угол раскрыва резонатора с коллекторного конца и, таким образом, неизбежно возрастают омические потери в выходном конусе. Соответственно, для точного решения задачи оптимизации требуется более сложная система уравнений, учитывающая нефиксированность структуры ВЧ поля и реальный профиль резонатора.

Другим важным вопросом разработки и оптимизации субмиллиметровых гиротронов, работающих на гармониках гирочастоты, является проблема селективности рабочего типа колебаний. Имея простые оценки на величину стартового тока паразитной моды в зоне генерации рабочей, можно делать выводы о правильности выбора моды и подборе оптимальных параметров пучка и резонатора. Ниже представлены некоторые аналитические выражения, позволяющие оценить возможность возбуждения паразитной моды в зоне генерации рабочей.

В приближении фиксированной структуры ВЧ поля $f(z) = \sin(\pi \cdot z/L)$, $0 < z < L$, стартовый ток I_{st} определяется выражениями⁹⁵⁹⁶⁹⁷:

⁹⁵ Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1967. Т.10. №9–10. С.1414.

⁹⁶ Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons/ The Johns Hopkins University press/ Baltimore-London 2004

$$\frac{1.2 \cdot Q \cdot I_{st} \cdot L \cdot \beta_{\perp}^{2n-2}}{10^3 \cdot \gamma_0 \cdot \lambda \cdot \beta_{\parallel}^2} \left(\frac{n^n}{2^n n!} \right)^2 G_{mp} \chi = 1 \quad (2.11)$$

$$\chi = \left(-n - \mu \frac{d}{d\theta} \right) \frac{1 + \cos(\theta)}{2 \cdot [1 - (\theta/\pi)^2]^2} \quad (2.12)$$

Здесь $\theta = (\omega - n \cdot \omega_H) \frac{L}{v_{\parallel}}$ - угол пролета электронов.

В данной формуле не учтен разброс скоростей электронов, так как он мало влияет на стартовые условия и КПД рабочей моды. Однако при рассмотрении паразитной моды, возбуждающейся в зоне генерации рабочей, следует иметь в виду, что она обладает продольной структурой с несколькими продольными вариациями ВЧ поля q . Число вариаций q оценивается по разнице магнитных полей для минимумов стартовых токов рабочей и паразитной моды. Распределение ВЧ-поля в этом случае может представляться функцией $f(z) = \sin(\pi \cdot q \cdot z/L)$. С учетом влияния разброса скоростей, который может в несколько раз повысить стартовой ток моды с таким распределением (как было показано в предыдущей главе) функция $\chi(\theta)$ примет следующий вид:

$$\chi(\theta) = \frac{1}{\int f(v_{\perp}) \beta_{\parallel} dv_{\perp}} \int \beta_{\parallel} \cdot \left(-n - \mu \frac{d}{d\theta} \right) \frac{q^2 \cdot [1 - \cos(\theta + q\pi)]}{2 \cdot [q^2 - (\theta/\pi)^2]^2} f(v_{\perp}) dv_{\perp}, \quad (2.13)$$

Где $f(v_{\perp})$ - функция распределения электронов по поперечным скоростям, предполагаемая гауссовой. В большинстве рассматриваемых нами гиротронов $\mu \gg 1$, так что можно получить простое аналитическое выражение для функции $\chi(\theta)$ и ее максимума χ_{\max}

$$\chi_{\max} = 0.6 \cdot \pi \frac{\sqrt{2}\mu}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2} - \frac{\sigma}{\sqrt{2}\mu}\right). \quad (2.14)$$

Где $\sigma = \pi \sqrt{\frac{q^2 g^4 \delta v_{\perp}^2}{4} + 1}$. На рисунке 2.3 приведены результаты сравнения

прямого численного интегрирования по формуле (2.13) и аппроксимации (2.14).

⁹⁷ Антаков И.И., Ергаков В.С., Засыпкин Е.В., Соколов Е.В. // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1977. Т.20. №4. С.605.

Таким образом, зная стартовый ток паразитной моды в ее основной зоне генерации (то есть соответствующий случаю одной продольной вариации ВЧ-поля), можно по разнице магнитных полей в этой зоне и в зоне рабочей моды оценить стартовый ток в зоне генерации рабочей моды.

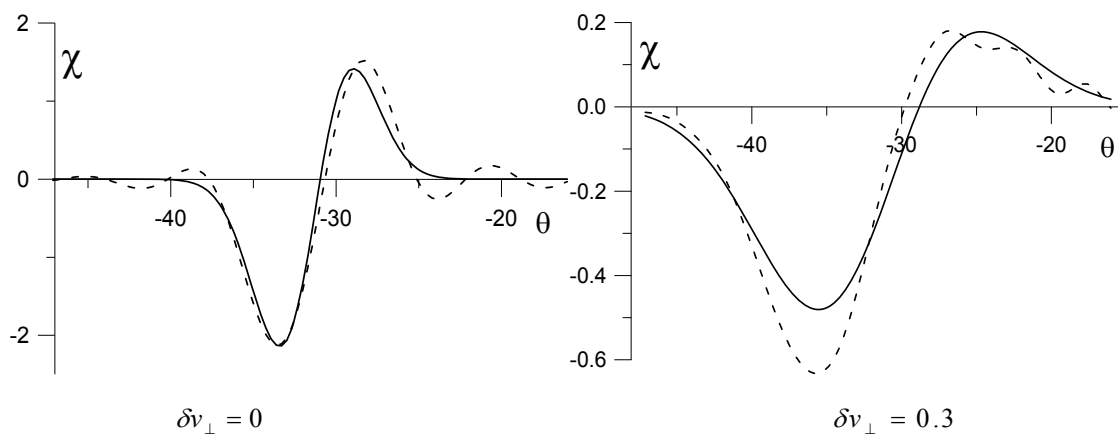


Рисунок 2.3. Сопоставление численного интегрирования и аналитической оценки для вычисления стартового тока. Пунктирная линия – численное интегрирование по формуле (2.13), сплошная линия - приближение по формуле (2.14).

2.1.2 Нахождение оптимальных режимов в гиротронах диапазона 0.26-0.8 ТГц.

В рамках диссертации было выполнено численное моделирование режимов генерации для нескольких гиротронов, работающих на различных гармониках гирочастоты, в диапазоне частот от 0.26 ТГц до 0.8 ТГц. Эти гиротроны имеют относительно простую электродинамическую систему в виде отрезка волновода круглого сечения с закритическим сужением в виде входного сужающегося конуса и дифракционным выводом энергии через выходной расширяющийся конус. Параметры резонатора оптимизировались для достижения максимального выходного КПД в режиме устойчивой одномодовой генерации рабочей моды. Для расчетов использовалась самосогласованная модель, описанная в предыдущей главе, учитывающая нефиксированное распределение продольного ВЧ-поля, разброс скоростей электронов и омические потери.

В первую очередь для каждого гиротрона производился выбор рабочей моды. Ограничения были в основном связаны с возможностями формирования высококачественного электронного пучка в магнетронно-инжекторной пушке⁹⁸⁹⁹. Для гиротронов на второй гирогармонике к ним также прибавлялись ограничения, связанные с плотностью спектра паразитных мод, особенно на первой гармонике гирочастоты. Затем при заданных параметрах электронного пучка, связанного как с результатами электронного оптического анализа, так и с характеристиками планируемых источников питания происходила оптимизация параметров электродинамической системы, обеспечивающих максимальный волновой КПД и минимальную трансформацию в другие моды в выходном конусе. При работе на высших гармониках гирочастоты приходилось также исследовать зависимости стартовых токов рабочей и паразитных мод от

⁹⁸ *Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., Postnikova A.S., Zapevalov V.E. // Int. J. Infrared and MM Waves, 1999. V.20. №3. P.361.*

⁹⁹ *Sh. Tsimring, Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics // John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey 2007*

магнитного поля (пример на рисунок 2.4) и при необходимости корректировать как начальные данные, так и выбор оптимальных параметров.

Основные результаты оптимизации приведены в таблице 2.1. Полученные для этих гиротронов мощности в несколько сотен Ватт, позволяют надеяться на их эффективное использование для целого ряда научно-технических приложений. В следующих двух главах процедуры оптимизации и выбора оптимальных параметров будут рассмотрены более детально на примере двух экспериментально реализованных гиротронных комплексов: с гиротроном, работающим на второй гармонике гирочастоты, и частотой 0.26 ТГц и гиротроном с близкой частотой, работающим на первой гирогармонике.

Таблица 2.1 Результаты расчетов выходных параметров нескольких субтерагерцовых гиротронов

| Частота, ТГц | Номер гармоники | Рабочая мода | Ток пучка, А | Ускоряющее напряжение, кВ | Выходная мощность, кВт |
|--------------|-----------------|--------------|--------------|---------------------------|------------------------|
| 0.26 | 2 | TE -2,3 | 0.5 | 15 | 0.2 |
| 0.26 | 1 | TE 5,3 | 0.1 | 15 | 0.4 |
| 0.4 | 2 | TE 6,5 | 0.4 | 20 | 0.15 |
| 0.4 | 3 | TE 6,4 | 3 | 15 | 0.7 |
| 0.52 | 2 | TE 6,5 | 0.4 | 15 | 0.1 |
| 0.8 | 2 | TE -10,5 | 0.4 | 20 | 0.1 |

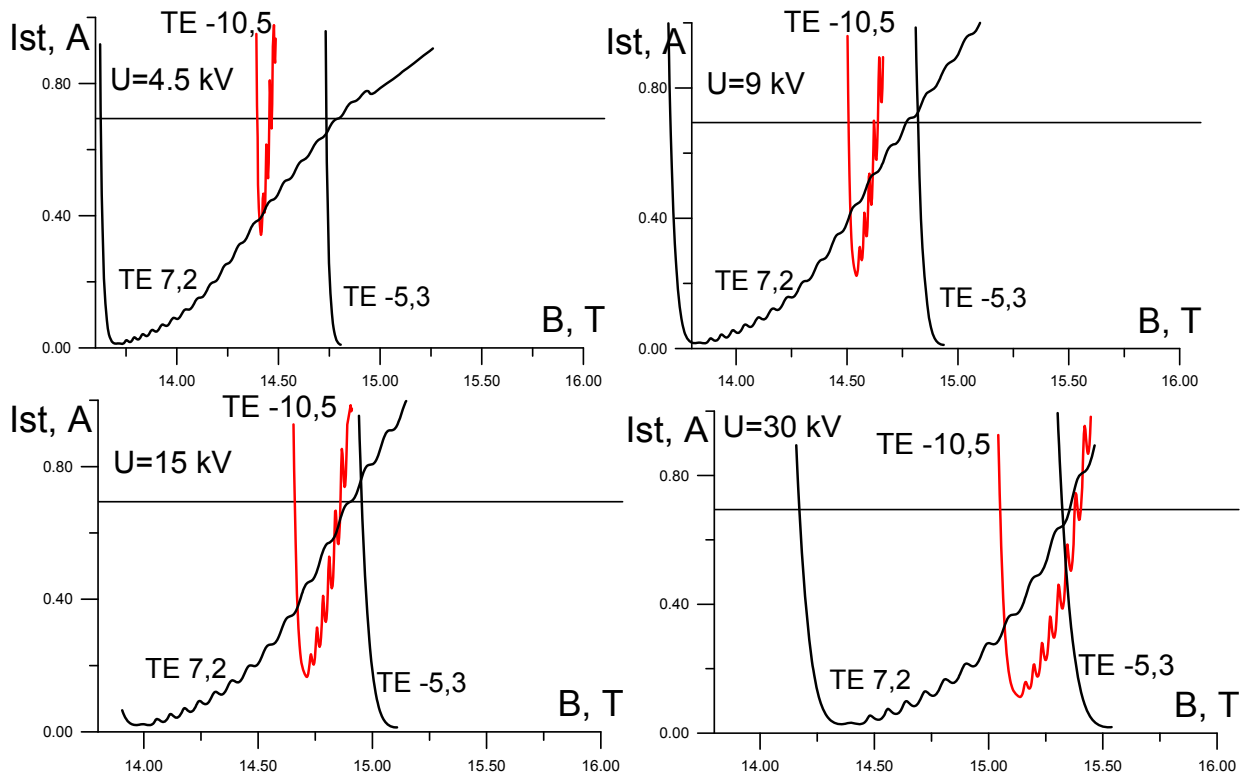


Рисунок 2.4 Зоны генерации рабочей и ближайших паразитных мод для непрерывного гиротрона, работающего на частоте 0.8 ТГц ($n=2$) для различных ускоряющих напряжений

2.2 Возможности плавной перестройки частоты в гиротронах суб-ТГц диапазона частот

Для ряда задач, в которых актуально использование суб-ТГц диапазона частот, требуется относительно широкая (порядка долей процента) перестройка частоты при сохранении заданного уровня мощности¹⁰⁰¹⁰¹. Как известно, в настоящий момент активно обсуждаются ряд подходов к реализации перестройки частоты¹⁰². В данном разделе рассматриваются несколько возможностей такой перестройки в субмиллиметровых гиротронах, предложенные соискателем.

2.2.1. Возбуждение последовательности мод с несколькими продольными вариациями ВЧ-поля.

При изменении магнитного поля в гиротроне может происходить переход между режимами генерации с различным числом продольных вариаций ВЧ-поля. На рисунке 2.5 приведен пример численного расчета зоны генерации непрерывного гиротрона с частотой 0.26 ТГц на второй гармонике гирочастоты упоминаемого в п. 2.1.2 и более детально рассмотренного в гл.3. При выбранных параметрах электронного пучка и размерах резонатора возможна генерация моды с четырьмя продольными вариациями поля. При этом производная частоты от магнитного поля для мод с большим числом продольных вариаций становится больше. Мощность мод с несколькими вариациями ВЧ-поля (при сохранении параметров пучка тока) обычно меньше

¹⁰⁰ Antonio C. Torrezan, Seong-Tae Han, Ivan Mastovsky, Michael A. Shapiro, Jagadishwar R. Sirigiri, Richard J. Temkin, Alexander B. Barnes, and Robert G. Griffin. Continuous-Wave Operation of a Frequency-Tunable 460-GHz Second-Harmonic Gyrotron for Enhanced Nuclear Magnetic Resonance // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, June 2010 Vol. 38, №. 6.

¹⁰¹ T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo, M. Pereyaslavets, N. Nishida, and K. Yoshida Development of frequency tunable, medium power gyrotrons (gyrotron FU series) as submillimeter wave radiation sources // IEEE Trans. Plasma Sci., Apr. 1999. V. 27, №2, P. 340–354.

¹⁰² M. Glyavin, T. Idehara, S. Mitsudo, I. Ogawa Investigations of fine frequency tuning potentialities of Gyrotrons FU Series // FIR Center Report, 2004, FIR-FU-53.

мощности моды с одной вариацией так как для них уменьшается дифракционная добротность, что приводит, как к снижению эффективности возбуждения.

Таким образом, обеспечивая возбуждение мод с как можно большим числом продольных вариаций ВЧ-поля, мы можем существенно расширить полосу перестройки в гиротроне, жертвуя, однако, при этом мощностью. Для серии приложений (например, спектроскопия и диагностика различных сред) выходная мощность не является определяющим параметром, в отличие от, например, задач электронно-циклотронного нагрева плазмы (ЭЦРН) или технологических процессов, тогда как перестройка частоты необходима для исследования спектра образца в относительно широком диапазоне.

Для реализации указанного механизма можно повысить дифракционную добротность резонатора. При этом для моды с одной вариацией, для которой полная добротность в основном определяется омическими потерями, стартовый ток практически не изменится (хотя выходная мощность упадет вследствие увеличения омических потерь); а для мод с несколькими вариациями поля дифракционная добротность убывает с ростом числа вариаций и, соответственно, снизится общая добротность. Таким образом, для увеличения стартового тока моды с как можно большим числом продольных вариаций можно, например, увеличивать длину резонатора, чтобы уровень дифракционной добротности был достаточен для их возбуждения.

В качестве иллюстрации на рисунке 2.6 приведены результаты численного моделирования для гиротрона с частотой 0.26 ТГц, но с резонатором длиннее на 25 % ($L = 40$ мм). Как видно, в этом случае возможно возбуждение моды с шестью продольными вариациями. Главной проблемой остаются «провалы» в генерируемой мощности при смене продольного индекса моды. Решить эту проблему можно, используя комбинированную перестройку частоты, когда вместе с изменением магнитного поля изменяется критическая частота резонатора. При этом зона генерации сдвигается вдоль оси магнитного поля (рисунок 2.6 пунктирная линия). Изменять критическую частоту можно,

регулируя температуру воды, охлаждающей резонатор. Таким образом, одновременной настройкой магнитного поля и температуры охлаждающей воды (то есть фактически радиуса резонатора) можно оптимизировать зависимость мощности генерации при широкополосной перестройке частоты.

Простейшие термомеханические оценки показывают, что для резонатора из меди перестройка с помощью изменения температуры составляет 5 МГц/градус. Однако при рассмотрении реальной термомеханической задачи нужно учитывать наличие внешнего кожуха и характер течения потока воды, температура которого остается практически постоянной вне зависимости от режима работы прибора. Более сложные оценки показывают, что данная величина может снизиться до 3 МГц/градус (экспериментальные результаты это подтверждают). Изменяя температуру контура на 80 градусов, можно изменить выходную частоту на 240 МГц, что соответствует разнице частот между модами с разным числом продольных вариаций в рассматриваемом гиротроне. Полный диапазон перестройки частоты при этом составляет 1 ГГц (примерно 0.4 % от опорной частоты) при уровне выходной мощности не менее 50 Вт.

Другим способом увеличения дифракционной добротности мод с несколькими вариациями является использование конусного резонатора (с уменьшением радиуса в сторону коллектора). При этом КПД моды с одной вариацией падает, так как, во-первых, омические потери в стенках резонатора увеличиваются, а во-вторых, максимум ВЧ-поля смещается в сторону катода, что приводит к снижению эффективности отъема энергии у электронного пучка¹⁰³. На рисунке 2.7 приведена зона генерации для цилиндрического резонатора (пунктирная линия) и для конусного резонатора с разницей катодного и коллекторного радиусов 2 микрона. Как видно, при этом КПД

¹⁰³ Моисеев М. А., Нусинович Г. С. Некоторые результаты численных исследований уравнений гиротрона // Гиротрон. Сб. научных трудов. — Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 41-52.

моды с одной вариацией падает практически до нуля, но расширяется зона генерации мод с несколькими вариациями, а также увеличивается их КПД.

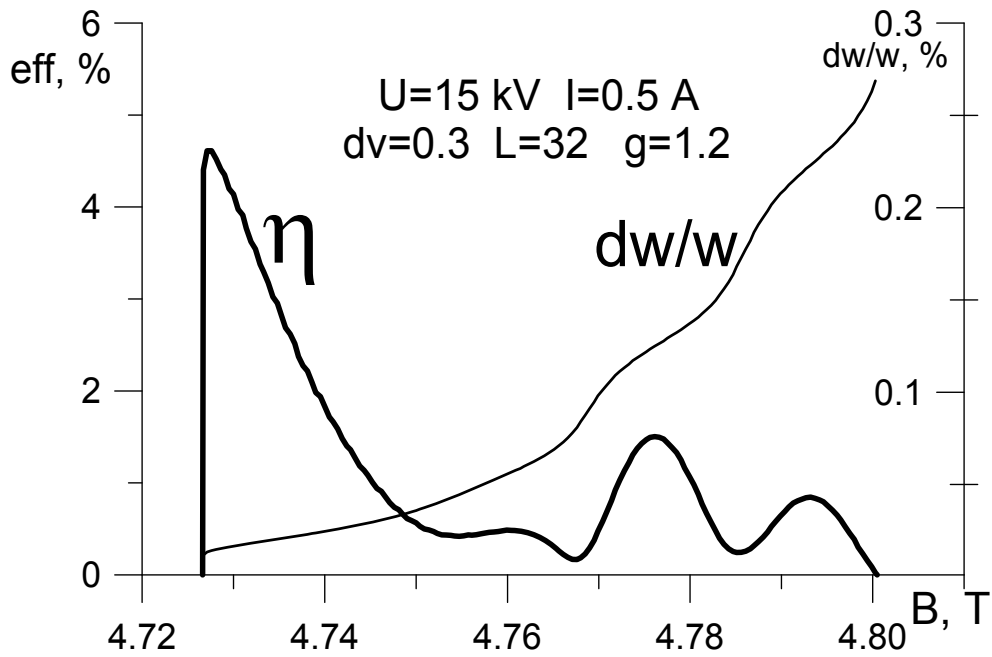


Рисунок 2.5 Зона генерации рабочей моды (толстая линия) и перестройка частоты от магнитного поля гиротрона с частотой 0.26 ТГц на второй гирогармонике при длине цилиндрической части резонатора 32 мм

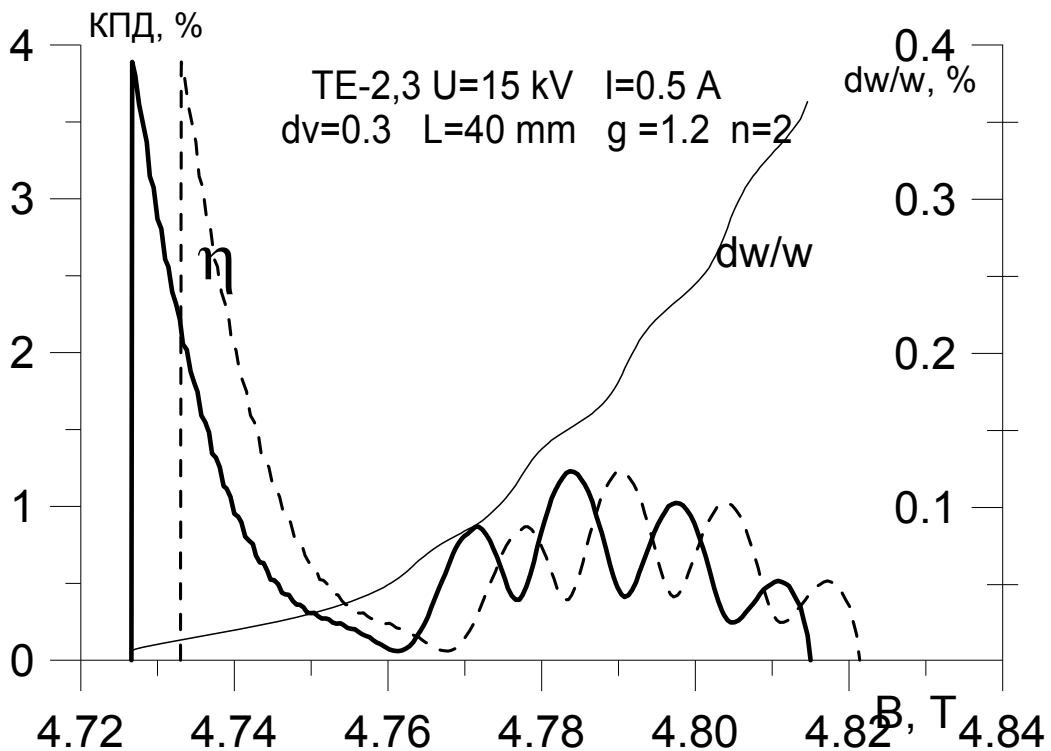


Рисунок 2.6 Зона генерации рабочей моды (толстая линия) и перестройка частоты от магнитного поля гиротрона с частотой 0.26 ТГц на второй гармонике гирочастоты при длине цилиндрической части резонатора 40 мм. Пунктирная линия - зона генерации при изменении температуры охлаждающей воды на 40 градусов

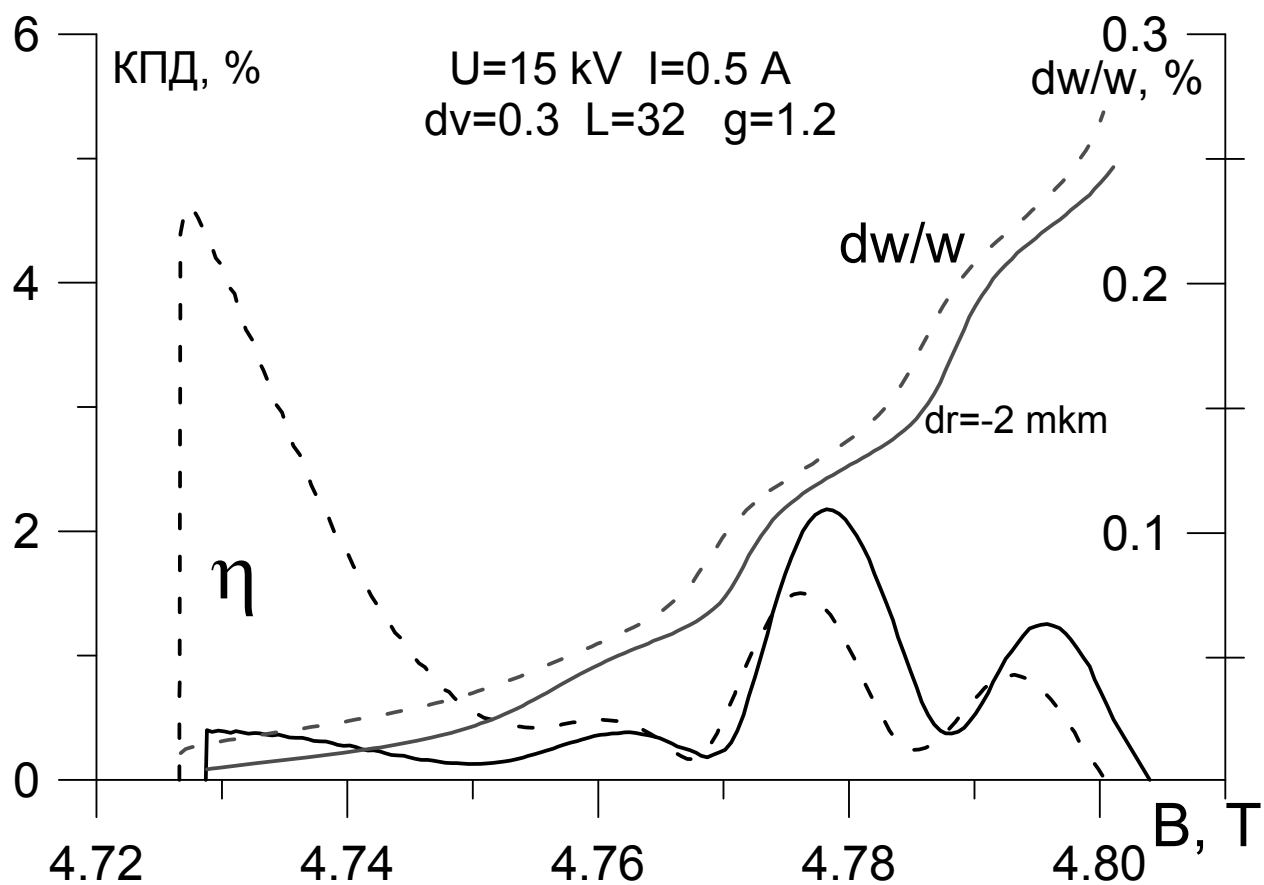


Рисунок 2.7. Зона генерации гиротрона с частотой 0.26 ТГц на второй гирогармонике. Пунктирная линия – цилиндрический резонатор, сплошная линия - конусный резонатор с разницей радиусов 2 микрометра

2.2.2. Гиротрон с обращенной электродинамической системой

Изрезанность зоны генерации при переходе между модами с различным числом продольных вариаций можно уменьшить, подобрав такую электродинамическую систему, для которой при увеличении магнитного поля режим гиротронного возбуждения моды с одной продольной вариацией ВЧ-поля плавно переходит в режим работы гиро-ЛОВ.

Данный режим можно реализовать, используя электродинамическую систему с выходным расширением со стороны электронной пушки и закритическим сужением со стороны коллектора. Схематически такая система изображена на рисунке 2.8. В таком гиротроне вблизи критической частоты режим возбуждения будет эквивалентен гиротрону с обычной электродинамической системой. При этом излучение будет отражаться от коллекторного конца, и распространяться в сторону электронной пушки. При дальнейшем увеличении магнитного поля продольная структура ВЧ-поля становится аналогичной гиро-ЛОВ и соответственно возможна сравнительно плавная перестройка частоты (рисунок 2.9).

В качестве примера возьмем за основу уже упоминавшийся маломощный гиротрон на второй гармонике гирочастоты с частотой около 0.26 ТГц. Параметры электронного пучка следующие: напряжение 15 кВ, ток 0.5 А, пич-фактор 1.2, относительный разброс поперечных скоростей 0.3, рабочая мода $TE_{2,3}$. На рисунке 2.10 приведены зависимости стартовых токов рабочей моды. Сравнение проведено с результатами моделирования гиротрона с такими же исходными данными, но классической электродинамической системой с цилиндрическим резонатором и выходным расширением в сторону коллектора. В дальнейшем будем называть такой прибор гиротроном с обыкновенной электродинамической системой. Длина цилиндрической части в обеих рассматриваемых системах была одинакова и составляла 35 мм. Как видно из рисунка 2.10, эффект существенного снижения стартовых токов наблюдается для рабочей моды с достаточно большим числом продольных вариаций ВЧ-поля (порядка 5-6). Однако зависимость стартовых токов, а соответственно и

зона генерации остается достаточно изрезанной. Сделать зону генерации менее изрезанной можно, уменьшив отражение волны от катодного расширения, например, используя плавное профилирование, а не излом. При этом уменьшение дифракционной добротности компенсируется увеличением эффективной длины взаимодействия пучка и волны, а стартовый ток моды с несколькими продольными вариациями в целом остается постоянным при сглаживании зависимости стартового тока от магнитного поля (рисунок 2.11), и, как следствие, зоны генерации (рисунок 2.12).

Ширина полосы в инвертированной системе в полтора раза больше чем в аналогичном обыкновенном резонаторе. КПД в данной системе составляет 1-1.5 %, что при указанных выше параметрах электронного пучка дает мощность порядка 100 Вт, достаточную для большинства спектроскопических приложений.

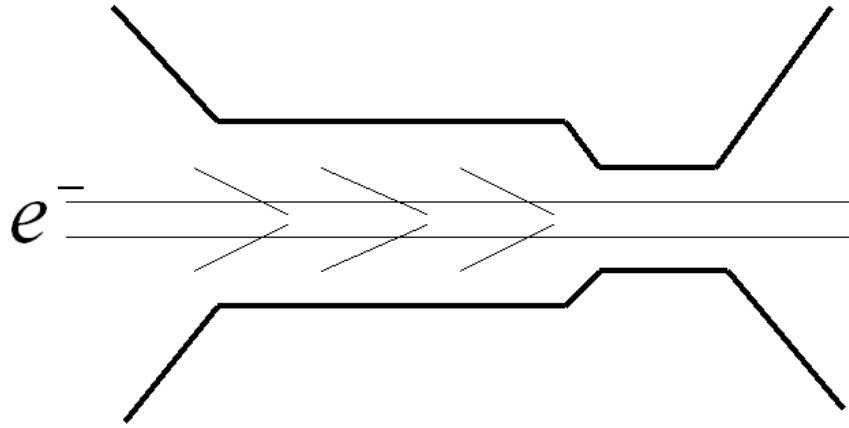


Рисунок 2.8 Общий вид используемой электродинамической системы

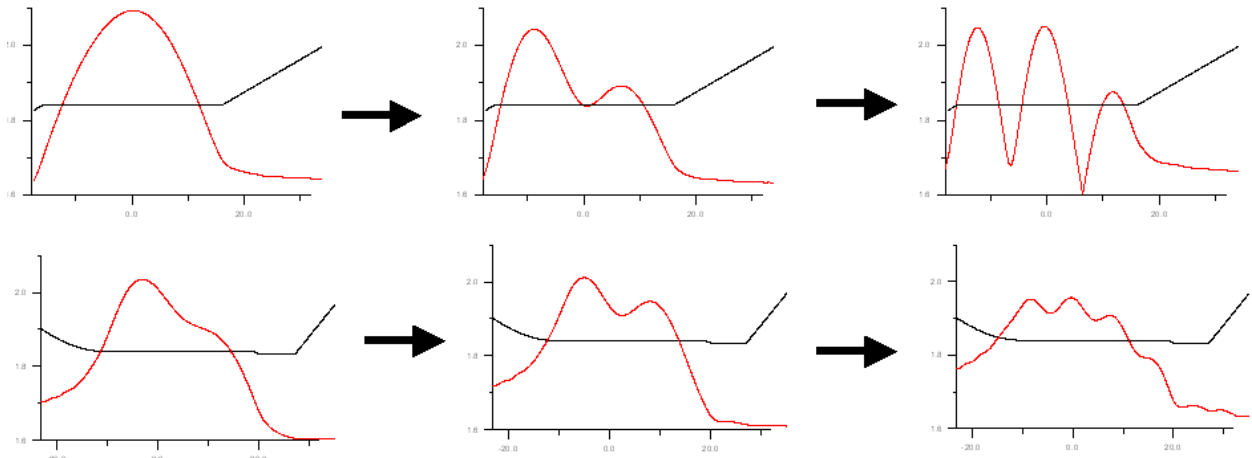


Рисунок 2.9 Эволюция продольной структуры ВЧ-поля в резонаторе при увеличении магнитного поля. Верхняя серия рисунков - случай электродинамической системы с излучением в сторону коллектора, нижняя серия- с излучением в сторону катода.

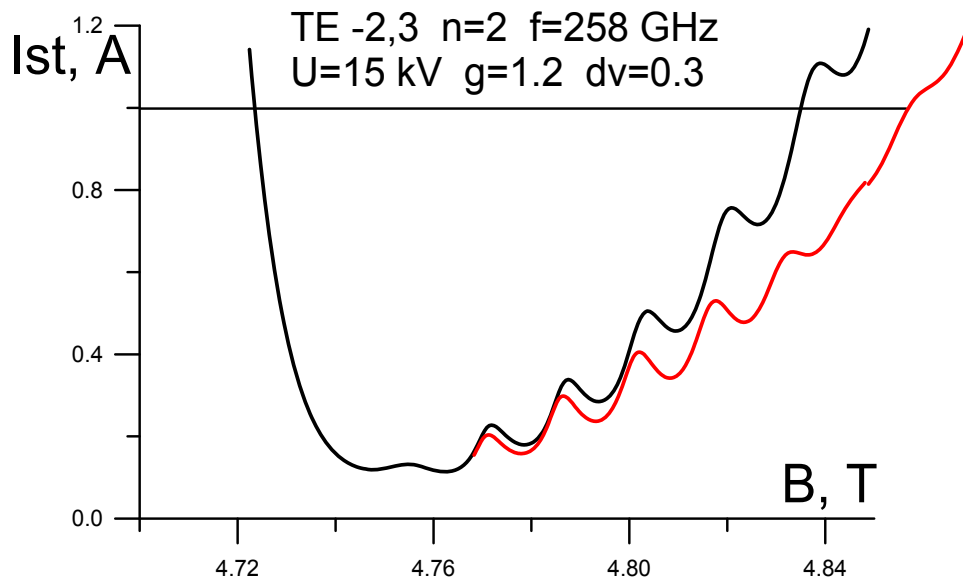


Рисунок 2.10 Зависимости стартовых токов от магнитного поля. Черная линия: гиротрон с обычным резонатором. Красная линия: инвертированный резонатор

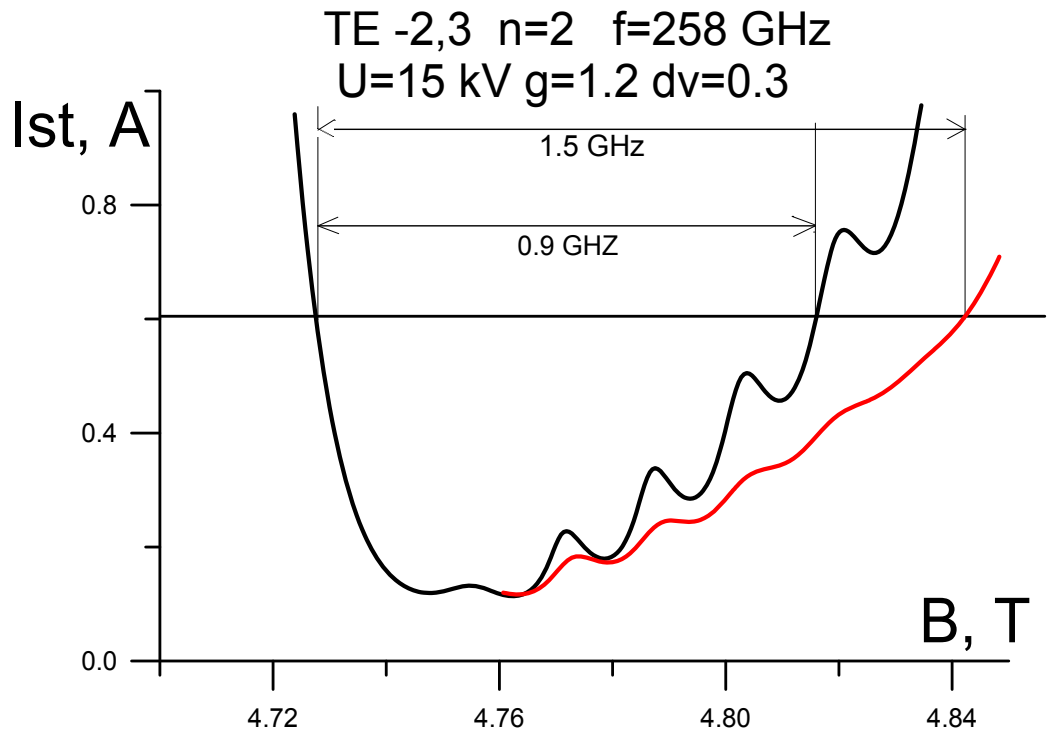


Рисунок 2.11 Зависимости стартовых токов от магнитного поля. Черная линия: гиротрон с обыкновенной электродинамической системой.. Красная линия: инвертированный резонатор с закруглением в сторону катода

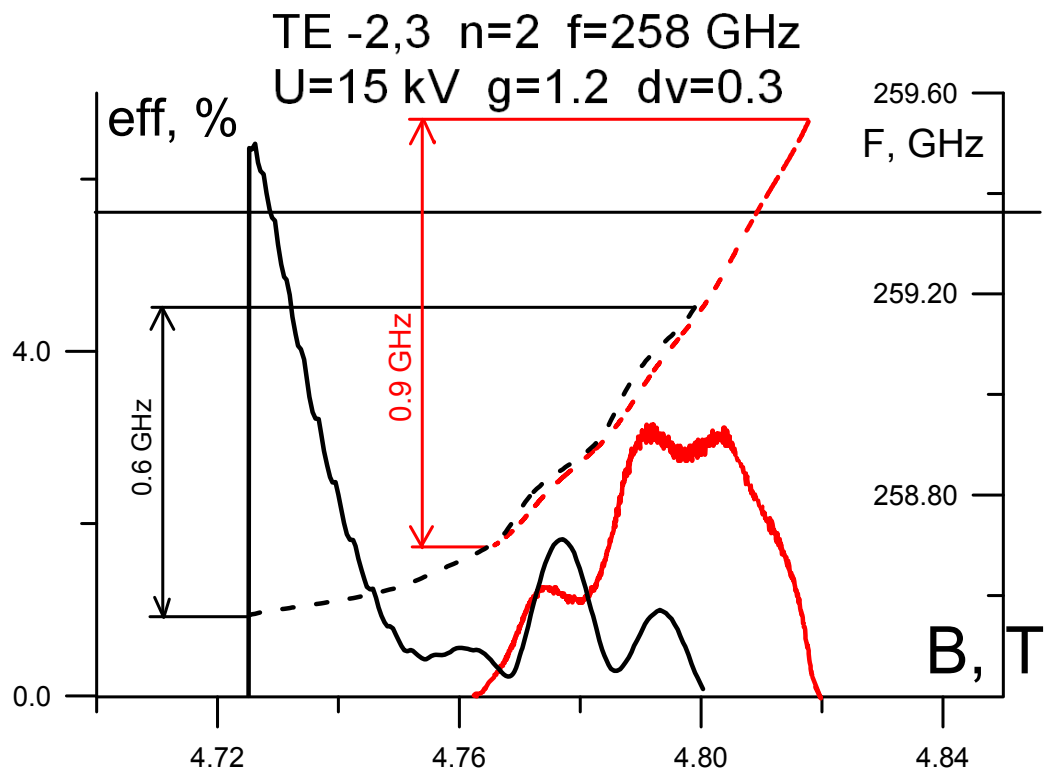


Рисунок 2.12 Зависимости выходного КПД от магнитного поля. Черная линия: гиротрон с обычным резонатором. Красная линия: инвертированный резонатор с плавным профилем расширения в сторону катода

2.3 Развитие методов повышения селекции рабочего типа колебаний в гиротронах суб-ТГц и ТГц диапазона частот

Как уже отмечалось, задачу освоения гиротронами все более высокочастотных диапазонов можно решать, проектируя гиротроны на гармониках гирочастоты. Однако при этом остро встает проблема селекции мод. В данном разделе рассматриваются возможности повышения селекции рабочей моды при использовании двух видов электродинамических систем: аксиально-симметричного гофрированного резонатора и ступенчатого резонатора с трансформацией мод (СРТМ).

2.3.1 Селекция мод в гиротроне с гофрированным резонатором

Рассмотрим резонатор, поверхность стенки которого аксиально-симметрична, а ее профиль вдоль оси гиротрона представляет периодическую структуру с медленно меняющейся амплитудой, то есть фактически набор канавок, глубина которых медленно меняется вдоль оси резонатора. При этом ВЧ-поле проникает в канавки на некоторое расстояние, зависящее от частоты падающей на поверхность волны; причем, чем меньше частота волны, тем меньше данное расстояние. Это позволяет подобрать профиль огибающей таким образом, чтобы для рабочей моды на второй гармонике гирочастоты усредненная критическая частота не зависела от продольной координаты z , а для паразитной моды зависела сильно. То есть, если представить гофрированный резонатор в виде эквивалентного гладкого резонатора, то для рабочей моды он будет отрезком регулярного (цилиндрического) волновода, а для паразитной моды – нерегулярного волновода. При этом добротность паразитной моды будет гораздо меньше, чем добротность моды в регулярном волноводе, что, в свою очередь, может привести к существенному увеличению стартового тока паразитной моды при сохранении стартового тока рабочей. Профиль резонатора будем представлять в следующем виде:

$$\psi(z) = \psi_0(z) + \Delta\psi(z) \quad (2.15)$$

где $\psi_0(z)$ профиль обычного резонатора без гофрировки, представляющего собой входной конус (закритическое сужение), переходящий в участок цилиндрического волновода, а затем в выходное конусное расширение. Такой профиль резонатора типичен для субмиллиметровых гиротронов.

Профиль гофрировки $\Delta\psi(z)$ можно описать следующей функцией:

$$\Delta\psi(z) = \left(b - a \cdot \sin^6\left(\frac{\pi z}{d}\right) \right) F(z), \quad 0 < z < L. \quad (2.16)$$

Где a - величина амплитуды гофрировки, d - период гофрировки, L - длина цилиндрической части резонатора $F(z)$ - огибающая гофрировки (медленная функция от z , т.е. характерная длина изменения функции много больше величины d).

Для примера будем рассматривать маломощный 0.3 ТГц гиротрон, работающий на моде $TE_{8,5}$ (вторая гармоника гирочастоты). Параметры пучка и электродинамической системы возьмем следующие: ускоряющее напряжение 20 кВ, питч-фактор электронного пучка 1.2, рабочий ток до 2 А, длина участка взаимодействия 20 мм, период гофрировки $d = 1$ мм. При таком периоде глубина проникновения рабочей моды в пазы максимальная, но еще отсутствует брэгговское рассеяние рабочей моды в пространственные гармоники.

Для выбранной рабочей моды основным конкурентом является мода $TE_{-1,4}$ на первой гармонике гирочастоты. При отсутствии гофрировки рабочая мода и паразитная мода в зоне генерации рабочей моды имеют приблизительно одинаковые стартовые токи, и в результате конкуренции мод устанавливается режим с генерацией паразитной моды.

На первом этапе необходимо было установить параметры эквивалентного регулярного резонатора в зависимости от частоты излучения и параметров гофрировки. Решение данной задачи, во-первых, позволяет оценить значение амплитуды гофрировки, при которой эффект будет становиться значительным, а во-вторых, дает информацию об оптимальном значении параметра b . Задача

об отражении моды от гофрированной стенки эквивалентна следующей задаче.

Задана металлическая поверхность $F(x, z) = a \cdot \sin^6\left(\frac{\pi z}{d}\right)$, то есть периодическая

вдоль оси z и однородная вдоль оси x . На нее наклонно (в плоскости x, y)

падает E -поляризованная волна, то есть имеющая компоненты (E_x, E_y, H_z) .

При этом угол падения φ к оси y высчитывается из первоначальной задачи о

распространении волны $TE_{m,p}$ в круглом резонаторе по следующей формуле:

$$\sin(\varphi) = m / \mu_{mn} \quad (2.17)$$

Где μ_{mp} -корень уравнения $J_m'(\mu_{mp}) = 0$, $J_m(\mu)$ -функция Бесселя.

Для рассматриваемых нами мод углы падения достаточно малы и задача сводится к нормальному падению волны с частотой $f \cos(\varphi)$.

В результате нахождения фазы отраженной волны, можно вычислить эффективную металлическую гладкую поверхность, эквивалентную гофрировке. Расчеты проводились методом интегральных уравнений аналогично задаче о падении плоской волны на бесконечную дифракционную решетку. Результаты численных расчетов высоты данной поверхности от частоты падающего излучения для различных амплитуд гофрировки приведены на рисунок 2.13. Как видно из рисунка, существенное различие для излучения на частоте 0.15 ТГц и 0.3 ТГц, начинается для амплитуды гофрировки около 0.35 мм. Таким образом, в дальнейших расчетах амплитуда гофрировки принималась равной $a = 0.35 \text{ мм}$.

Самым простым и то же время достаточно эффективным представляется вариант линейной огибающей гофрировки, то есть:

$$F(z) = \frac{L-z}{L}, \quad 0 < z < L. \quad (2.17)$$

При этом для паразитной моды эквивалентный резонатор представляет собой конус, раскрытый в сторону коллектора. На рисунок 2.14 приведен вариант такого профиля резонатора и структуры поля рабочей и паразитной моды.

Первым этапом была решена «холодная» (без учета электронно-волнового взаимодействия) задача по определению добротности гофрированного резонатора. Параметр b в численных расчетах подбирался из условий сохранения дифракционной добротности рабочей моды по сравнению со случаем регулярного резонатора. При этом было показано, что продольная структура ВЧ-поля рабочей моды менялась не сильно. Это дает основания оценивать выходной КПД как КПД резонатора без гофрировки.

На рисунке 2.15 приведены зависимости стартовых токов рабочей $TE_{8,5}$ и основной паразитной моды $TE_{1,4}$ в зависимости от ведущего магнитного поля в резонаторе. Пунктирная линия на рисунке - случай цилиндрического резонатора без гофрировки. Сплошные линии - случай гофрированного резонатора с глубиной гофрировки 0.35 мм и параметром b равным 0.106 мм. При таком значении параметра b стартовый ток рабочей моды в гофрированном резонаторе мало отличается от стартового тока в цилиндрическом резонаторе. Как видно из рисунка 2.15, при использовании гофрировки стартовый ток паразитной моды в зоне генерации рабочей моды увеличивается примерно в 5 раз. Это позволяет увеличить рабочий ток до 3 А.

Поскольку в реальной ситуации может наблюдаться значительный рост омических потерь¹⁰⁴, то основной эффект будет связан не с повышением КПД, а с повышением мощности вследствие существенного расширения диапазона рабочих токов.

¹⁰⁴ E. V. Kuposova Ohmic losses at plane wave diffraction on a metal corrugated surface // 26th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, July 22- 30, 2014, IAP RAS, Nizhny Novgorod.

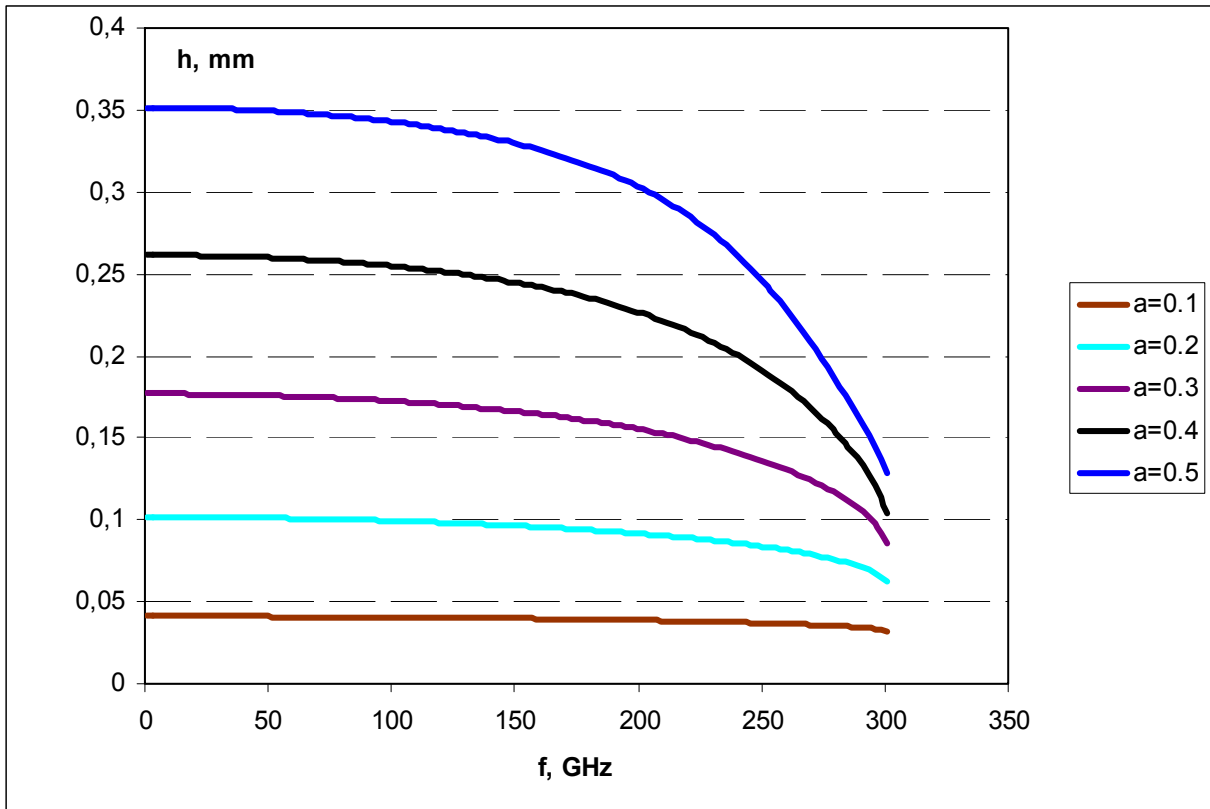


Рисунок 2.13. Расстояние от дна канавок до эффективной металлизированной гладкой поверхности в зависимости от частоты падающей волны для различных глубин гофрировки a (в мм)

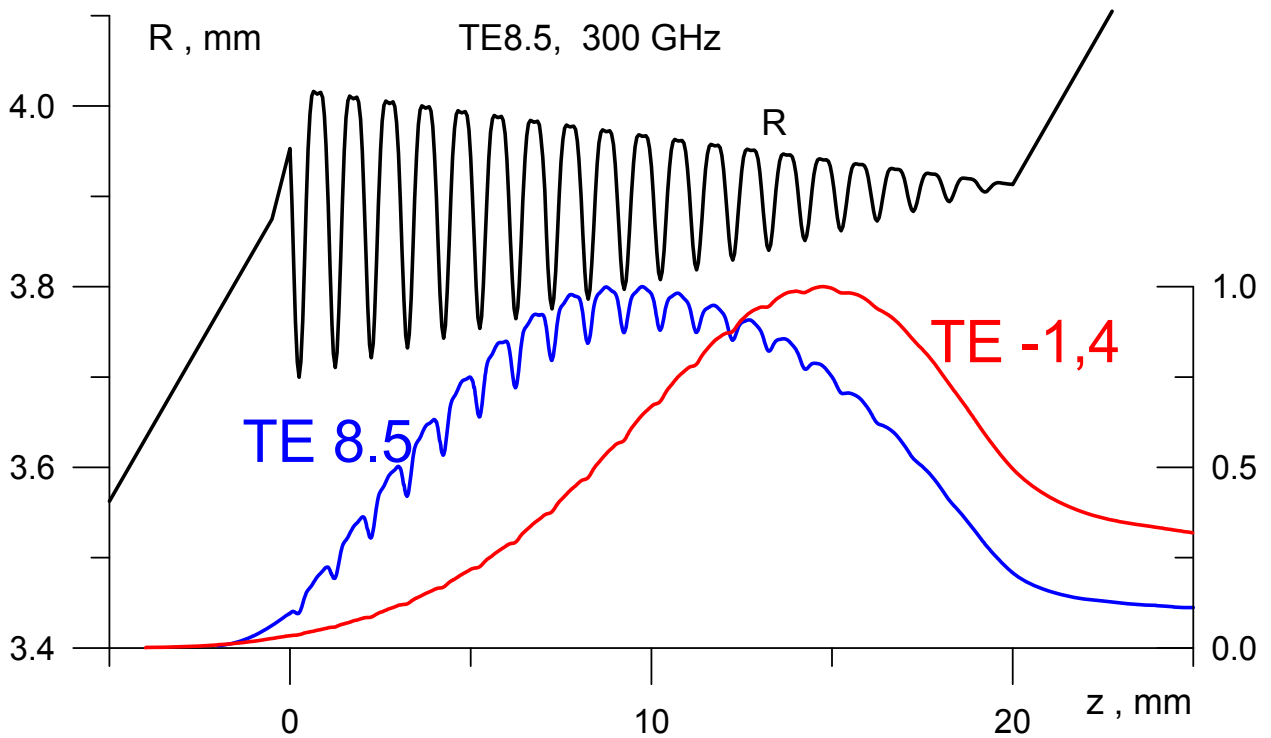


Рисунок 2.14. Профиль резонатора и продольная структура ВЧ-поля рабочей моды $TE_{8,5}$ и паразитной моды $TE_{-1,4}$

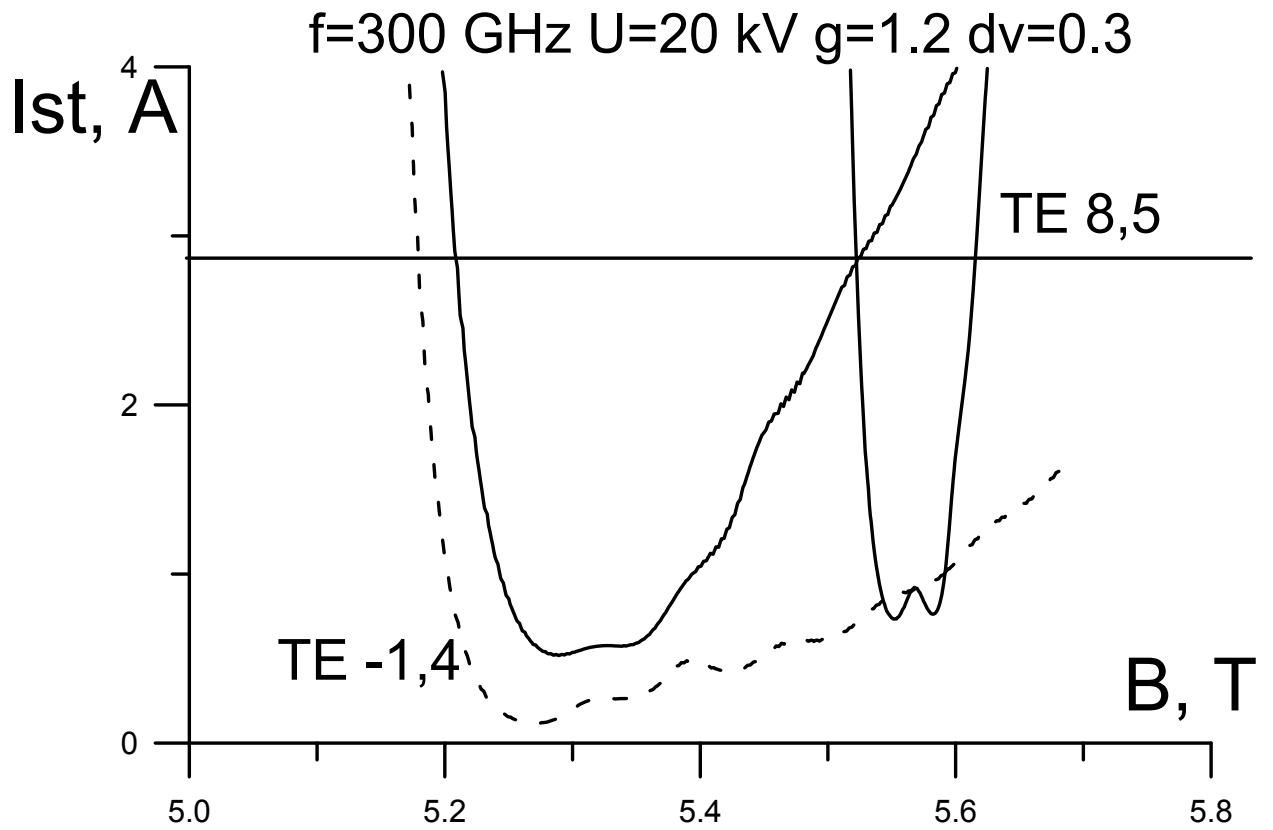


Рисунок 2.15. Зависимости стартовых токов рабочей моды $TE_{8,5}$ и ее основного конкурента - моды $TE_{-1,4}$ от магнитного поля. Пунктирная линия - случай цилиндрического резонатора.

Сплошные линии - гофрированный резонатор.

2.3.2 Гиротрон со ступенчатым резонатором

Одним из перспективных методов селекции в настоящее время является использование так называемых ступенчатых резонаторов. Это могут быть как связанные резонаторы с трансформацией мод (СРТМ)¹⁰⁵¹⁰⁶, так и эшелеттные резонаторы¹⁰⁷. В таких резонаторах существенно укорачивается участок эффективного взаимодействия с электронным пучком у паразитных мод, и как следствие, повышаются их стартовые токи.

Рассмотрим проект гиротрона, рассчитанный на генерацию излучения с частотой 2 ТГц на второй гармонике гирочастоты на базе импульсного соленоида с азотным охлаждением¹⁰⁸. При этом предполагается использовать магнитную и электронно-оптическую системы уже существующего и испытанного в ИПФ гиротронного комплекса. Электродинамическая система рассматриваемого гиротрона представляет собой ступенчатый резонатор с одной ступенькой и оптимизируется таким образом, чтобы, с одной стороны, получить наименьший стартовый ток рабочей моды, с другой стороны - подавить генерацию паразитных мод при заданных параметрах электронного пучка¹⁰⁹.

¹⁰⁵ *Запевалов В.Е., Малыгин С.А., Павельев В.Г., Цимринг Ш.Е.* Гиротроны на связанных резонаторах с трансформацией мод // Изв. вузов, Радиофизика, 1985, т. 27, №4.

¹⁰⁶ *Гольденберг А. Л., Малыгин В. И., Павельев А. Б., Павельев В. Г., Пылин А. В., Цимринг Ш. Е.* Мощный гиротрон на высоких модах связанных резонаторов с трансформацией мод // Гиротроны: Сб. науч. тр. ИПФ АН СССР. Горький, 1989. С. 40.

¹⁰⁷ *Власов С. Н., Колосова Е. В., Павельев А. Б., Пылин А. В., Хижняк В. И.* Гиротрон с эшелеттным резонатором на 2-й гармонике гирочастоты // Письма в ЖТФ. - 1971. - Т. 17, вып. 4. - С. 10-12.

¹⁰⁸ *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu.,* Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // Phys. Rev. Lett., 2008, 100, 015101:1

¹⁰⁹ *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Повышение эффективности работы субмиллиметровых гиротронов за счет использования различных электродинамических систем // Материалы 20 Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, Украина, 2010, стр 295-296

Электронная пушка оптимизирована для формирования в резонаторе электронного пучка с радиусом 0.8 мм, рассчитана на работу в интервале ускоряющих напряжений 20-40 кВ (в расчетах выбрано значение напряжения $U=25$ кВ), ток пучка 1-6 А, питч-фактор 1.1 и относительный разброс осцилляторных скоростей электронов 0.3. Для того чтобы оптимальный радиус пучка в ступенчатом резонаторе также составлял величину около 0.8 мм для работы на второй гармонике и соответственно частоты 2 ТГц необходимо, чтобы азимутальный индекс рабочей моды находился в пределах величины 30-35. Внешний диаметр сменного блока резонатора (резонаторного вкладыша) при использовании рассматриваемого импульсного магнита равен 6 мм. Таким образом, из соображений прочности конструкции радиус резонатора не должен превышать 1.5 мм. Из этого следует, что радиальный индекс рабочей моды не может быть выше восьми.

Анализ соответствующих областей спектра собственных частот цилиндрического волновода позволяет выбрать в качестве возможного варианта комбинацию мод TE_{325} и TE_{326} , с радиусом первой секции резонатора 1.3 мм (здесь и далее рабочую комбинацию мод мы будем определять через моду, которая генерирует в первой секции резонатора) и частотой генерации около 2 ТГц. Оптимальный радиус электронного пучка равен 0.787 мм.

В качестве распределения ведущего магнитного поля в расчетах использовалось распределение поля реального импульсного магнита с величиной индукции до 50 Тл. Длина однородного участка поля на уровне спада 1.5 % составляет около 4 мм, соответственно длина рабочей части резонатора (то есть общая длина первой и второй секции) не должна превышать 4-5 мм. Также стоит отметить, что даже при наличии магнитного поля с достаточно большой длиной однородного участка, увеличение пространства взаимодействия связано существенным увеличением омических потери, а также с возрастанием опасности самовозбуждения паразитных мод.

В качестве первого приближения был выбран ступенчатый резонатор, состоящий из двух цилиндрических секций равной длины по 2 мм каждая.

Радиус первой секции 1.3 мм, радиус второй подбирался из условия возбуждения в ней моды TE_{326} и составляет 1.3929 мм (Рисунок 2.16). На катодном конце резонатора сделано закритическое сужение величиной 4 градуса к оси, с коллекторного конца конусный раскрыв с углом в 1 градус. Типичная картина конфигурации продольного распределения ВЧ-полей в резонаторе приведена на рисунок 2.16. В первой секции возбуждается мода TE_{325} в переходе (длиной приблизительно 0.04 мм) она эффективно трансформируется в моду TE_{326} . Амплитуды остальных мод вида TE_{32p} ($p \neq 5, 6$) при трансформации (на рисунке тонкие линии вблизи оси абсцисс) пренебрежимо малы. На рисунке 2.17 приведены зависимости стартовых токов комбинации рабочих мод и наиболее опасных паразитных мод от магнитного поля. Как видно из рисунка 2.17, наибольшую опасность для рабочей моды представляет мода TE_{153} на первой гармонике гирочастоты, возбуждающаяся в первой секции резонатора.

Одним из средств подавления данной моды является укорочение первой секции, при сохранении общей длины резонатора. При этом стартовый ток рабочей моды меняется незначительно, а стартовый ток паразитной моды увеличивается обратно пропорционально четвертой степени длины первой секции. Зависимости стартовых токов при длинах первой и второй секций 1.6 мм и 2.4 мм соответственно приведены на рисунке 2.18.

Следующим этапом оптимизации электродинамической системы было изменение радиуса одной из секций (для определенности будем изменять радиус второй). При этом можно уменьшить стартовый ток рабочей моды, не ухудшая условий возбуждения паразитной моды, а также оценить требуемую точность изготовления резонатора. На рисунке 2.19 приведена зависимость минимума стартового тока от изменения радиуса второй секции по сравнению с рассматриваемым ранее значением 1.3929 мм. Минимальный стартовый ток при этом составляет около 3.8 А, а погрешность изготовления резонатора, согласно расчетам, не должна превышать 0.5 мкм. Изготовление резонаторов с

такой точность на современном доступном оборудовании представляется невозможным, поэтому этот проект интересен, в основном, на отдаленную перспективу либо при использовании более низких частот.

Для оценки КПД генерации в ступенчатом резонаторе рассмотрено возбуждение моды TE_{325} с двумя продольными вариациями ВЧ-поля в случае регулярного цилиндрического резонатора, что с точки зрения взаимодействия с рабочей модой эквивалентно случаю ступенчатого профиля. При этом максимальный КПД, учитывая разброс скоростей и реальное распределения ведущего магнитного поля, при рассматриваемых параметрах в расчетах составил около 0.8 %, что является достаточно хорошим показателем для приборов данного диапазона частот.

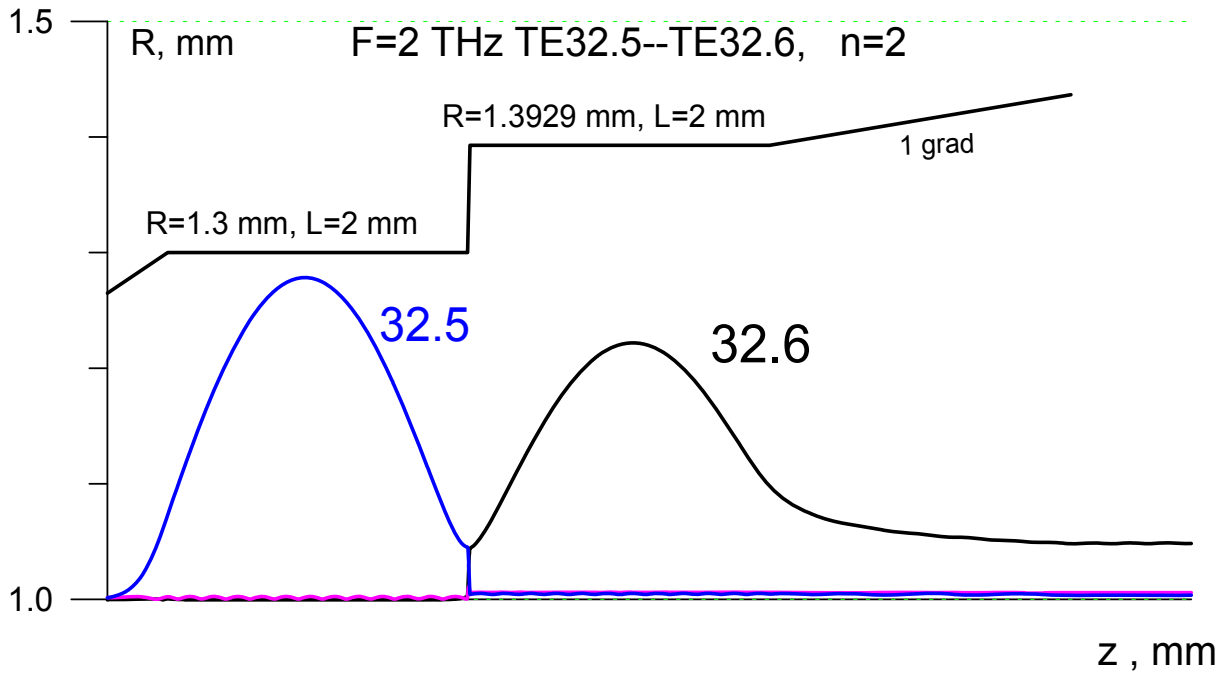


Рисунок 2.16. Профиль резонатора и распределение ВЧ-полей связанных мод $TE_{32,5}$ и $TE_{32,6}$.

U=25 kV f=2 THz g=1.1 L=4 mm
 Rp1=1.3 Rp2=1.3929 R0=0.787 dv=0.3

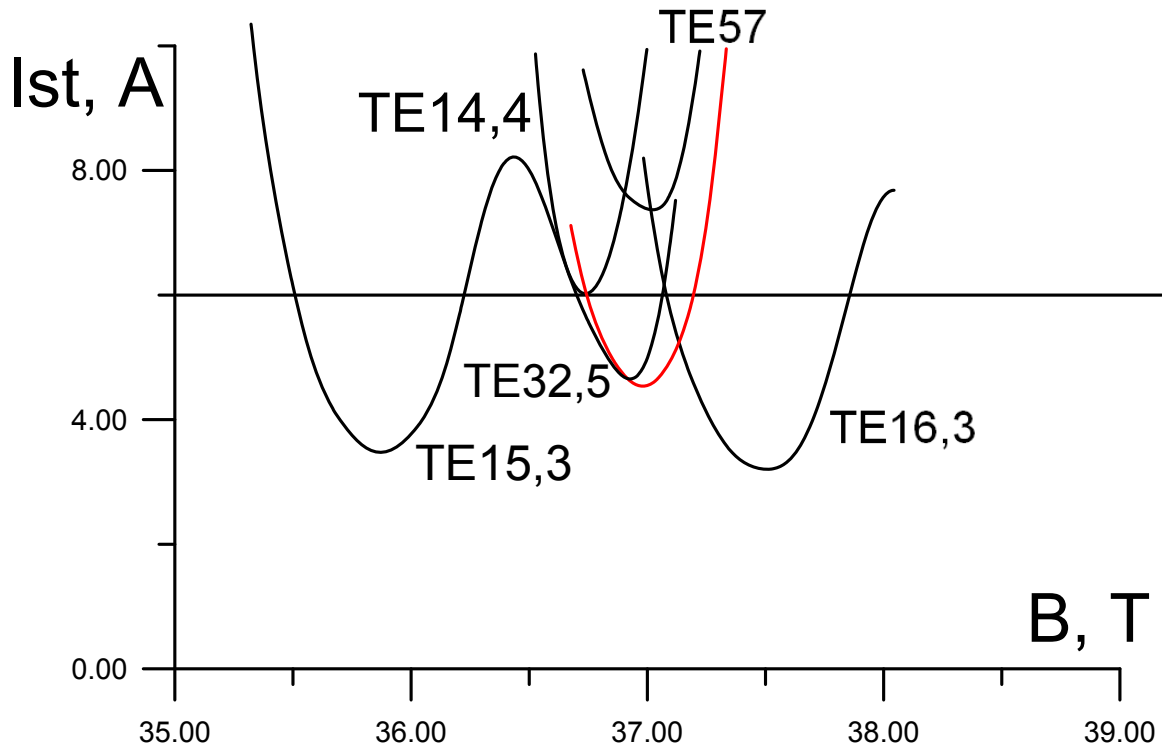


Рисунок 2.17 Зависимости стартовых токов рабочей и паразитных мод от магнитного поля в резонаторе с трансформацией мод.

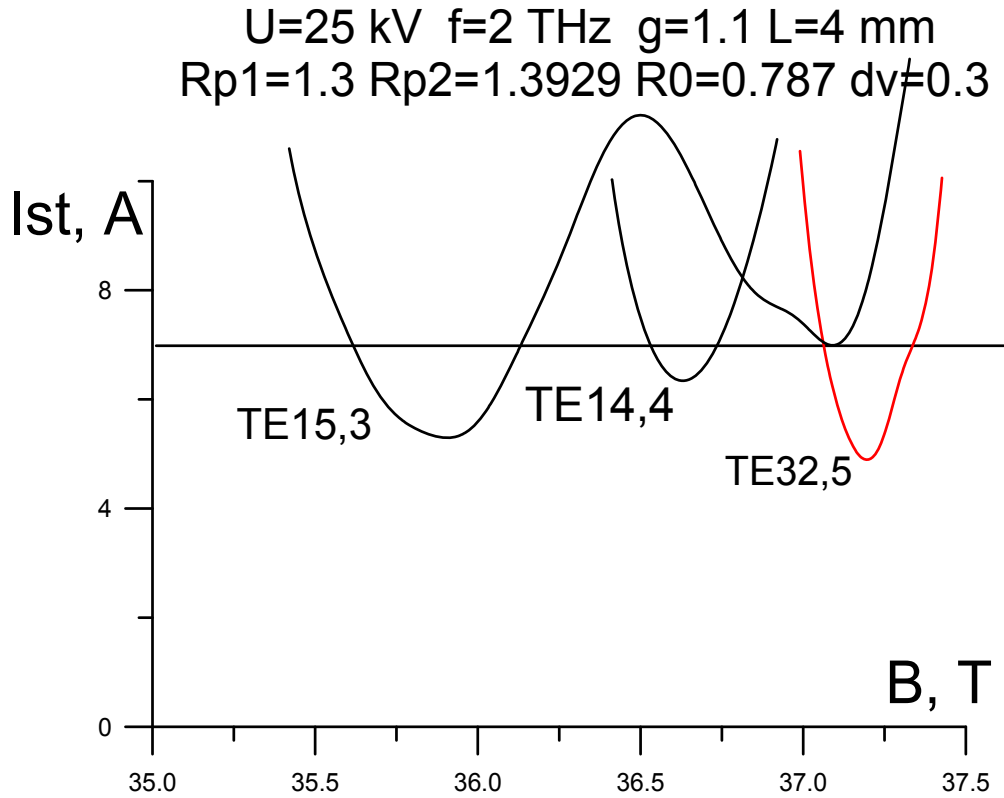


Рисунок 2.18. Стартовые токи рабочей и основных паразитных мод в резонаторе с трансформацией мод при длине первой секции $L_1=1.6$ и длине второй $L_2=2.4$ мм.

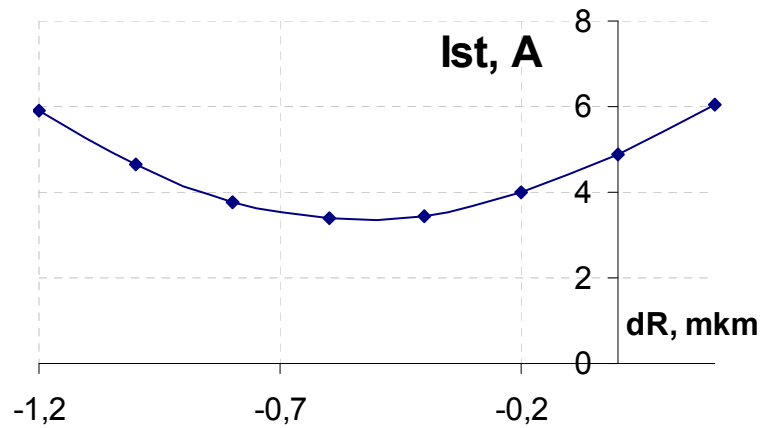


Рисунок 2.19. Зависимость минимума стартового тока от изменения радиуса второй секции по сравнению с исходным значением 1.3929 мм

Заключение.

В данной главе рассматриваются вопросы, связанные с аналитическим и численным исследованием субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов. В п. 2.1 на основе модели с фиксированной структурой ВЧ-поля получены зависимости КПД при учете омических потерь в резонаторе. Также выводятся аналитические формулы, позволяющие оценить КПД гиротрона при большой величине омических потерь, а также возможное возбуждение паразитных мод.

Представлены результаты численного моделирования и оптимизация ряда маломощных гиротронов с частотами 0.26-0.8 ТГц на различных гармониках гирочастоты с относительно простой электродинамической системой в виде отрезка цилиндрического волновода круглого сечения с закритическим сужением и выходным расширением. Для данных гиротронов были выбраны рабочие моды, подобраны параметры электродинамической системы, обеспечивающие высокий уровень КПД. Показано что для данных гиротронов можно обеспечить селективное возбуждение рабочей моды при уровне мощности сотни Ватт. Некоторые из описанных гиротронов были в дальнейшем изготовлены и протестированы, показывая хорошее согласование экспериментальных данных и результатов моделирования.

В п.2.2 рассматриваются способы увеличения полосы перестройки частоты в субмиллиметровых гиротронах. Показано, что использование комбинированной электронно-механической перестройки может обеспечить сравнительно плавную перестройку частоты в пределах 0.3 % при использовании режимов с несколькими продольными вариациями ВЧ-поля в резонаторе. Также предложен проект гиротрона электродинамической с электродинамической системой, обеспечивающий вывод излучения в сторону катода. При этом структура ВЧ-поля и режим генерации при повышении магнитного становится похожим на gyro-LWB, что обеспечивает сравнительно плавную перестройку частоты с полосой до 0.6 %

В п. 2.3 обсуждаются возможные варианты электродинамических систем с высокой селективностью относительно паразитных мод на первой гармонике

гирочастоты, что позволит увеличить диапазон рабочих токов, и как следствие приведет к повышению КПД и мощности, а при дальнейшем продвижении в терагерцовый диапазон к принципиальной возможности создания приборов.

В частности, рассматривается профиль резонатора, представляющий собой гофрированную периодическую структуру с медленно меняющейся амплитудой. При этом можно подобрать профиль огибающей таким образом, чтобы для рабочей моды на второй гармонике гирочастоты критическая частота не зависела от продольной координаты, а для паразитной моды зависела. При этом стартовые токи мод на первой гармонике существенно увеличиваются, а для рабочей практически не меняются. Также рассматривается вопрос использования двухступенчатых резонаторов со связанными модами, на примере проекта импульсного гиротрона с частотой 2 ТГц. Показано, что данный гиротрон может генерировать на второй гармонике гирочастоты с мощностью около 1%.

Для обоих вариантов рассматриваемых систем исследован вопрос оптимизации в целях эффективного возбуждения рабочей моды и подавления возбуждения паразитных мод.

Глава 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 0.258 ТГц НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ГИРОЧАСТОТЫ

Для задач спектроскопии в ИПФ РАН был разработан, изготовлен и испытан непрерывный гиротрон с частотой 0.258 ТГц, работающий на второй циклотронной гармонике. В настоящее время этот гиротрон является одним из ключевых элементов спектроскопического комплекса для исследования динамической поляризации ядер в институте биохимии М. Планка (Франкфурте-на-Майне, Германия)¹¹⁰. В данной главе будут рассмотрены и обсуждены особенности оптимизации данного гиротрона с учетом предъявляемых к нему требований¹¹¹¹¹²¹¹³, результаты экспериментального

¹¹⁰ *Vasyl Denysenkov , Mark J. Prandolini , Marat Gafurov , Deniz Sezer , Burkhard Endeward and Thomas F. Prisner //Phys. Chem. Chem. Phys., 2010, №12, P.5786.*

¹¹¹ *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Оптимизация резонатора непрерывного 258 ГГц гиротрона на второй гармонике гирочастоты. // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2009, Т.52, №5-6, С.418-424.¹¹² *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Особенности разработки высокостабильного непрерывного гиротрона с рабочей частотой 258 ГГц на второй гармонике // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №12, С.972-978.

¹¹² *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Особенности разработки высокостабильного непрерывного гиротрона с рабочей частотой 258 ГГц на второй гармонике // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №12, С.972-978.

¹¹³ *Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Седов А.С., Цалолихин В.И.* Система формирования электронного пучка для гиротрона с частотой 258 ГГц, предназначенного для экспериментов по динамической поляризации ядер // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, 53, 4, 251-259.¹¹⁴ *Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолихин В.И.* Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер. // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, Т.53, №4, С.260-268.

исследования¹¹⁴, сопоставление теоретических и экспериментальных данных и их анализ, направленный на улучшение выходных характеристик прибора.

¹¹⁴ Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запелов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолыхин В.И. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер. // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, Т.53, №4, С.260-268.

3.1 Особенности конструкции гиротрона и основные расчетные параметры

Поскольку основным предъявляемым к источнику излучения требованием является высокая стабильность выходного излучения, а эффективность и максимальная мощность не играют определяющей роли, заказчиком были сформулированы следующие характеристики для разрабатываемого гиротрона:

1. Рабочая частота 0.2586 ± 0.0005 ТГц.
2. Мощность на входе в спектрометр после линии транспортировки излучения 20 Вт.
3. Стабильность частоты и мощности не хуже, чем 0.003 % и 10 %, соответственно, при работе гиротрона не менее 12 часов.
4. Простота эксплуатации неспециалистами.
5. Высокая надежность и долговечность.

Одним из самых дорогих и сложных узлов любого терагерцового гиротронного комплекса является магнитная система. В силу того, что требуемый уровень выходной мощности на порядок меньше мощностей, характерных для непрерывных гиротронов на первой гирогармонике того же диапазона частот¹¹⁵, то целесообразно было проектировать данный гиротрон на второй гармонике гирочастоты, чтобы уменьшить ее стоимость.

В качестве рабочей моды была выбрана мода $TE_{-2,3}$, которая с одной стороны, имеет достаточно редкий спектр паразитных мод, особенно на первой гармонике гирочастоты, а с другой стороны, позволяет сформировать в магнетронно-инжекторной пушке пучок с приемлемыми характеристиками (разброс скоростей и питч-фактор), а также с радиусом пучка в резонаторе, соответствующим максимуму фактора связи.

Данный гиротрон предназначен для работы в непрерывном режиме с высокой стабильностью выходных параметров, и его конструкция

¹¹⁵*V.S. Bajaj, C.T. Farrar, M.K. Hornstein, I. Mastovsky, J. Viereg, J. Bryant, B. Elena, K.E. Kreisler, R.J. Temkin, and R.G. Griffin, Dynamic nuclear polarization at 9 T using a novel 250 GHz gyrotron microwave source // Journal of Magnetic Resonance 2003 V.160 P.85–90*

предусматривает аксиальный вывод энергии на рабочей моде. Для управления выходными параметрами был выбран тип пушки с изолированным анодом. Основные параметры гиротрона для удобства представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. основные параметры гиротронного комплекса

| Параметр | Ед. изм. | Значение |
|---|-------------------|-----------|
| Рабочая частота | ГГц | 258,6±0,5 |
| Номер гармоники | | 2 |
| Ускоряющее напряжение, U_0 | кВ | 15 |
| Анодное напряжение (анод-катод), U_a | кВ | 7-15 |
| Магнитное поле в резонаторе (ном. режим 15 кВ; 0,5 А) | Т | 4,727 |
| Ток пучка (номинальное значение) | А | 0,5 |
| Плотность тока на эмиттере (не более) | А/см ² | 2,5 |
| Радиус резонатора | мм | 1,844 |
| Средний радиус пучка в резонаторе | мм | 0,984 |
| Относительная осцилляторная энергия не менее | | 0,6 |
| Питч фактор не менее | | 1,2 |
| Разброс поперечных скоростей, не более | % | 30 |

Магнитная система гиротрона состоит из сверхпроводящей катушки с обмоткой из двух секций, а также дополнительной катодной катушки (в проектном режиме она не использовалась) для тонкой подстройки параметров электронного пучка.

Электродинамическая система данного гиротрона представляет собой однородный участок цилиндрического волновода круглого сечения длины L , имеющий входное конусное сужение с углом 4° к оси аксиальной симметрии прибора. В ходе численного моделирования величины L и угол выходного раскрыва a были оптимизированы. На рисунке 3.1 (а) приведены значения КПД

в зависимости от длины резонатора и угла a при питч-факторе $g = 1.2$, ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного пучка 0,5 А, относительном разбросе поперечных скоростей 0.3. Расчеты показывают, что в зависимости от величины питч-фактора $g = 1 - 1.2$ максимальный КПД составляет 4,5-7% и генерируемая мощность достигает 340-520 Вт. Одновременно с этим, поскольку при указанных параметрах добротность резонатора $Q \approx 10000$, электронная перестройка для моды с одной вариацией ВЧ поля частоты не превышает 25 МГц (10^{-4} в относительных единицах). Максимальный КПД ограничен долей омических потерь, которая возрастает с увеличением длины резонатора.

На рисунке 3.1 (б) представлены профиль оптимизированного резонатора гиротрона ($L = 36$ мм, $a = 0,1^\circ$) и продольное распределение амплитуды высокочастотного поля рабочей моды $TE_{2,3}$, а также текущее значение КПД ($g = 1.2$). Стоит отметить, что при дальнейшем уменьшении угла раскрыва возрастают потери в выходном конусе; и для дальнейшей оптимизацией данной системы необходимо постепенно увеличивать угол раскрыва выходного перехода, но таким образом, чтобы групповая скорость возрастала, а отражения волны практически не возникало. В этом случае можно заметно сократить омические потери в выходном переходе. Решение данной задачи требовало изготовления плавного перехода с высокой точностью, что труднореализуемо на практике, и в результате был выбран достаточно простой вариант с постоянным углом раскрыва.

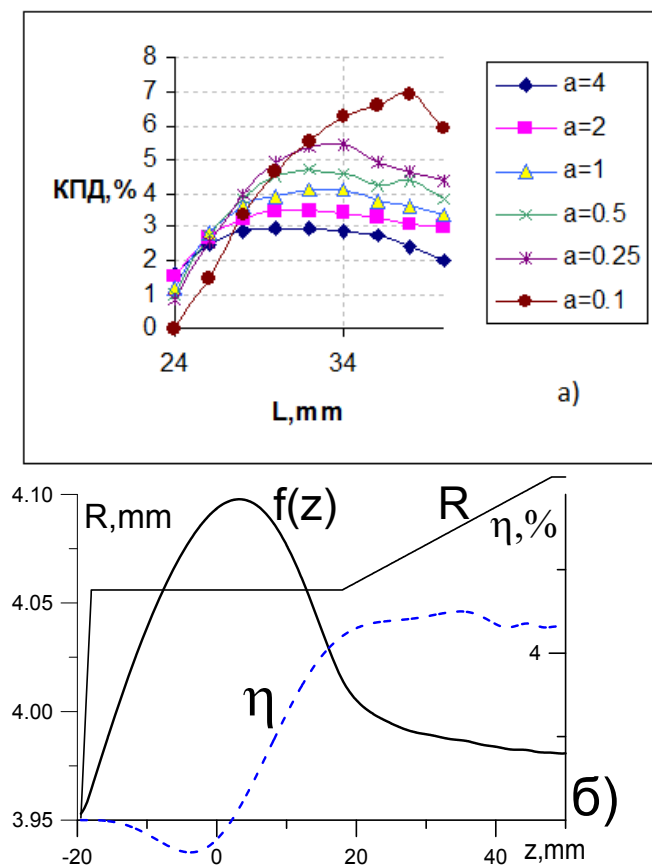


Рисунок 3.1. а) Зависимости КПД от длины цилиндрической части резонатора на моде $TE_{2,3}$ для различных значений угла раскрытия a выходного перехода (в градусах) при $g = 1.2$
 б) Оптимальный профиль резонатора на моде $TE_{2,3}$, продольная структура ВЧ поля $f(z)$, штриховая линия – текущий КПД $\eta(z)$.

Как уже неоднократно отмечалось, при работе гиротрона на второй гармонике гирочастоты основную опасность представляет самовозбуждение паразитных мод, синхронных с первой гармоникой ($n=1$), и стартовые токи которых на порядок меньше, чем на $n=2$ ¹¹⁶. Численно это можно увидеть, проанализировав выражение для стартового тока приводившиеся в п. 2.1. Из данного выражения так же видно, что самовозбуждение мод на более высоких

¹¹⁶Петелин М.И. Электронная селекция мод в гиротроне. // В сб.: Гиротроны ИПФ АН СССР. Горький, 1981. С.77-85

гармониках исключено при таких низких напряжениях, поскольку их стартовые токи на порядки больше¹¹⁷.

На рисунке 3.2 показана зона генерации рабочей моды $TE_{2,3}$ в оптимизированном резонаторе и стартовые токи паразитных мод. Следует отметить, что паразитная мода $TE_{3,1}$ ($n = 1$) самовозбуждается при использовании расчетной моноскоростной модели, не учитывающей разброс скоростей электронов (пунктир на рисунок 3). Однако, в модели с учетом типичного относительного разброса начальных поперечных скоростей электронов $\delta v_{\perp} = 0.3$, близкого к экспериментально измеренному значению для гиротронов миллиметрового диапазона¹¹⁸, при рабочем токе электронного пучка паразитная мода $TE_{3,1}$ не возбуждается (сплошная линия стартового тока на рисунке 3.2). При этом разброс скоростей электронов сравнительно слабо влияет на КПД рабочей моды: при $\delta v_{\perp} = 0.3$ КПД составляет около 0.9 от значения КПД в модели без разброса.

Профиль реального резонатора всегда в той или иной мере отличается от расчетного в силу погрешностей технологических процессов. Неточность изготовления цилиндрической части резонатора может привести к тому, что он примет, например, форму усеченного конуса, что существенно отражается на его добротности¹¹⁹ и, как следствие, на КПД гиротрона. На рисунке 3.3 приведены расчетные зависимости КПД и добротности гиротрона с конусным резонатором от разницы выходного и входного радиусов резонатора dR в микронах (мкм) при сохранении величины диаметра входного сечения. Как видно из графика, допустимой можно считать нерегулярность в 1 мкм, когда

¹¹⁷ Glyavin M.Yu., Zavolskiy N.A., Sedov A.S., Nusinovich G.S. Low-Voltage Gyrotrons // Physics of Plasmas, 2013, №20, 033103:1-7

¹¹⁸ Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А. // Радиотехника и электроника, 1974, т.19, №5, с.1056-1060.

¹¹⁹ Запелов В.Е., Малыгин О.В. Дифракционная добротность слабokonических резонаторов гиротронов. // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1983, Т. 26, №7, С. 903-905.

резонатор раскрывается в сторону коллектора (положительный раскрыв), и 0.5 мкм при сужении в сторону коллектора (отрицательный раскрыв). Повышение КПД при небольших положительных раскрывах резонатора можно объяснить изменением продольной структуры ВЧ-поля, которая становится более близкой к треугольной, и, следовательно, более эффективной с точки зрения электронно-волнового взаимодействия¹²⁰. При дальнейшем увеличении раскрыва наблюдается спад КПД, что связано с уменьшением добротности резонатора.

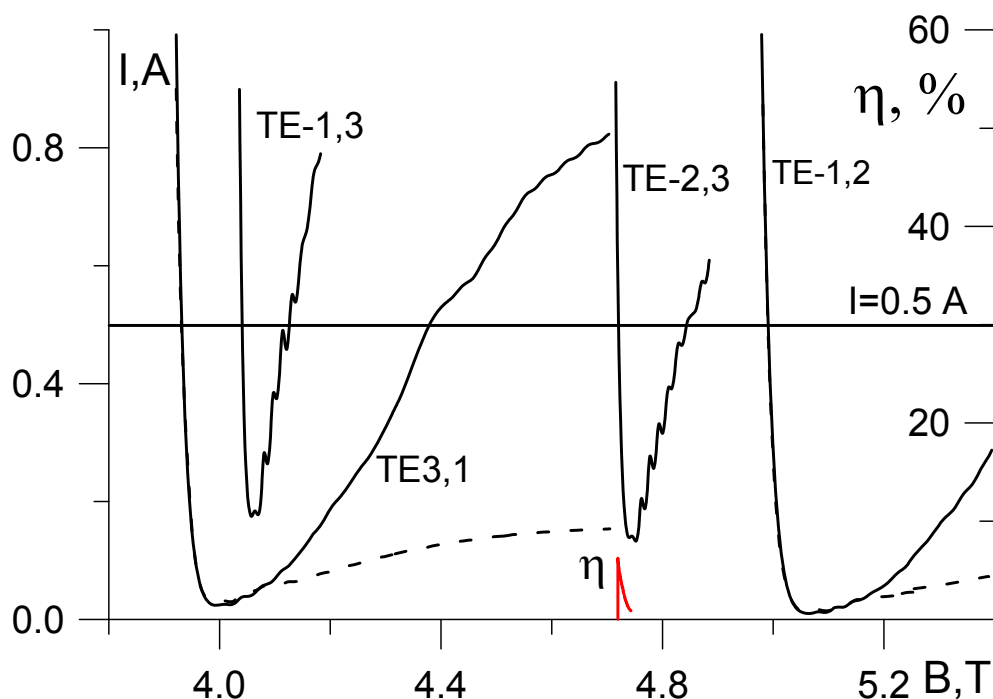
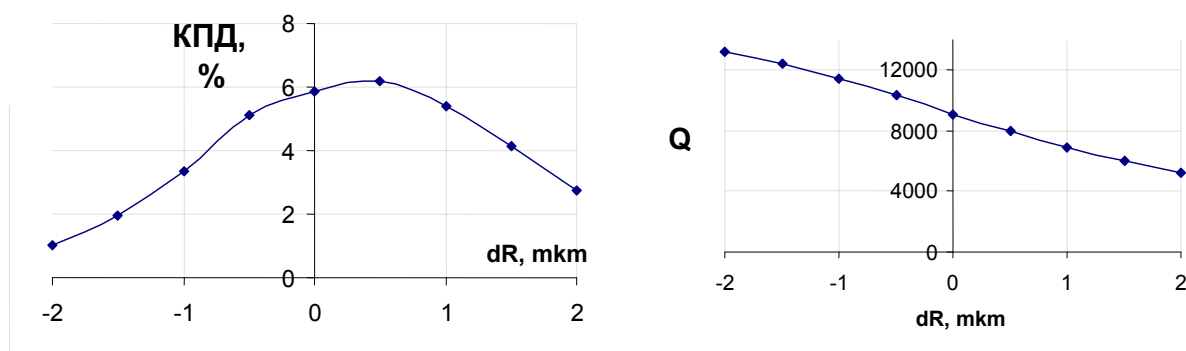


Рисунок 3.2. Зона генерации рабочей моды $TE_{2,3}$ $\eta(B)$ и стартовые токи паразитных мод в оптимизированном резонаторе, сплошные линии - $\delta v_{\perp} = 0.3$, пунктирные - $\delta v_{\perp} = 0$.



¹²⁰ Ю.В. Быков, С.А. Малыгин, Ш.Е. Цимринг Гиротроны с коррекцией распределения высокочастотного поля // В сб.: Гиротроны ИПФ АН СССР. Горький, 1981 С. 216-227.

Рисунок 3.3. зависимость КПД и добротности резонатора Q от разницы выходного и входного радиусов резонатора dR в микронах. Я бы увеличил картинку.

Характерное время выхода уровня поляризации ядер на насыщение составляет величину порядка нескольких часов и зависит от вида вещества, исследуемого в ЯМР спектрометре. При этом ключевым требованием к источнику накачки (в качестве которого в рассматриваемой установке выступает гиротрон) становится поддержание стабильности частоты излучения в течение всего этого времени. В ранее разработанных гиротронах для стабилизации выходных параметров использовалась цепь обратной связи¹²¹. В частности, в суб-ТГц гиротронах, разработанных в FIR FU, уход частоты компенсировался изменением ускоряющего напряжения системой АПЧ или анодного напряжения¹²². В разрабатываемом гиротроне использован расширенный подход, основанный на обеспечении высокой стабильности источников питания гиротронного комплекса с одновременной стабилизацией температуры резонатора.

Влияние флуктуаций технических параметров на режимы работы гиротрона ранее исследовалось в рамках общей теории (например, в работе¹²³), ниже эти эффекты будут рассмотрены применительно к конкретному гиротрону. Исследовались два режима работы магнетронно-инжекторной пушки (МИП): квазидиодный, когда анодное напряжение U_a пропорционально ускоряющему

¹²¹ Голубятников Г.Ю., Крупнов А.Ф., Лубяко Л.В. и др. Прецизионное управление частотой гиротрона с помощью фазовой автоподстройки частоты // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 15. С. 13.

¹²² T. Idehara, K. Yoshida, N. Nishida, I. Ogawa, M. Pereyaslavets, T. Tatsukawa CW operation of a submillimeter wave gyrotron (gyrotron FU IV) for high stability of the output frequency // Int. J. Infrared and MM Waves, 1998. V.19. №6. P.793

¹²³ O. Dumbrajs and G.S. Nusinovich, Effect of technical noise on radiation linewidth in free-running gyrotron oscillators // Physics of plasmas, 4(5), 1997, P. 1413-1423

напряжению U_0 , и триодный, когда U_a и U_0 изменяются независимо (определяются независимыми источниками).

В соответствии с адиабатической теорией МИП¹²⁴ зависимость питч-фактора g от напряжений U_a и U_0 определяется выражением:

$$g(U_0, U_a) = \frac{g_{st} U_a \sqrt{U_{0,st}}}{\sqrt{(1 + g_{st}^2) \cdot U_{a,st}^2 U_0 - g_{st}^2 U_a^2 U_{0,st}}}, \quad (3.1)$$

Где g_{st} , $U_{a,st}$, $U_{0,st}$ - средние значения параметров гиротрона. Относительный разброс скоростей электронов является величиной постоянной. Зависимость тока пучка I от U_a аппроксимируется формулой:

$$I = K \cdot U_a^{1/2}. \quad (3.2)$$

Если для формирования пучка используется дополнительная корректирующая катушка в области катода, необходимо учитывать еще один фактор, связанный с флуктуациями магнитного поля в катодной области. Учитывая возможные нестабильности поля основного соленоида (обозначим поле в области резонатора (B_0) и поле в области катода (B_k)) и считая что поле корректирующей катушки много меньше магнитного поля основного соленоида ($\Delta B_k \ll B_{k,st}$), получим следующие независимые выражения для величины питч-фактора в зависимости от полей основного и добавочного соленоидов:

$$g(B_0) = \frac{g_{st} \sqrt{B_0}}{(B_{0,st} (1 + g_{st}^2) - g_{st}^2 B_0)^{1/2}}, \quad g(B_k) = \frac{g_{st} B_{k,st}^{3/2}}{(B_k^3 (1 + g_{st}^2) - g_{st}^2 B_{k,st}^3)^{1/2}} \quad (3.3)$$

На рисунке 3.4 приведены расчетные зависимости КПД (сплошные линии) и расстройки частоты (пунктирные линии) от каждого из приведенных выше параметров, при условии, что остальные параметры фиксированы. Решение уравнений производилось в окрестности максимальной по КПД точки для заданных параметров электронного пучка. Приведенные рисунки также показывают диапазоны возможной перестройки частоты и мощности генерации

¹²⁴ Гольденберг А.Л., Петелин М.И. Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке. // Изв. вузов. Радиофизика, 1973. Т.16. №1. С.141

гиротрона. При линеаризации зависимостей в окрестности стационарного состояния получены коэффициенты пропорциональности между параметрами пучка и выходными характеристиками гиротрона η и f представленные в таблице 3.2.

Используя формулы (3.1)-(3.3), можно определить коэффициенты пропорциональности между отклонениями параметров источников питания и выходными параметрами излучения для конкретного гиротрона (таблица 3.3). В последней строчке таблицы приведены максимальные отклонения параметров источников питания, при которых относительное изменение частоты генерации не превышает требуемую заказчиком величину $\Delta f/f = 10^{-5}$.

Как уже отмечалось выше, в рассматриваемом гиротроне было предложено использовать систему, обеспечивающую высокую стабильность параметров охлаждения резонатора. При средней удельной омической нагрузке стенки резонатора $100\text{--}200 \text{ Вт/см}^2$ и суммарной мощности омических потерь около 1 кВт резонатор требует охлаждения с расходом воды 0.5 литра в секунду при условии ее нагрева за проход на 0.5°C . В соответствии с температурным коэффициентом расширения меди нагрев резонатора на 0.5°C (при отсутствии внешнего бандажирования) означает относительный уход резонансной частоты 10^{-5} из-за увеличения его диаметра. Таким образом, система охлаждения должна обеспечивать постоянство температуры резонаторного блока с точностью лучше 0.5°C . С другой стороны, независимый контур охлаждения резонатора, как уже отмечалось во второй главе, можно использовать для перестройки или тонкой подстройки частоты гиротрона.

Выходное окно гиротрона обычно проектируют в соответствии с требованиями безотражательного прохождения сигнала на рабочей частоте. На частотах паразитных мод коэффициент отражения от окна может при этом отличаться от нуля, что уменьшает стартовый ток паразитной моды и может привести к ее самовозбуждению.

Коэффициент отражения по мощности вычисляется следующим образом¹²⁵:

$$r_w = \frac{(1-\gamma)^2 \sin^2 \chi}{4\gamma \cos^2 \chi + (1+\gamma)^2 \sin^2 \chi} \quad (3.4)$$

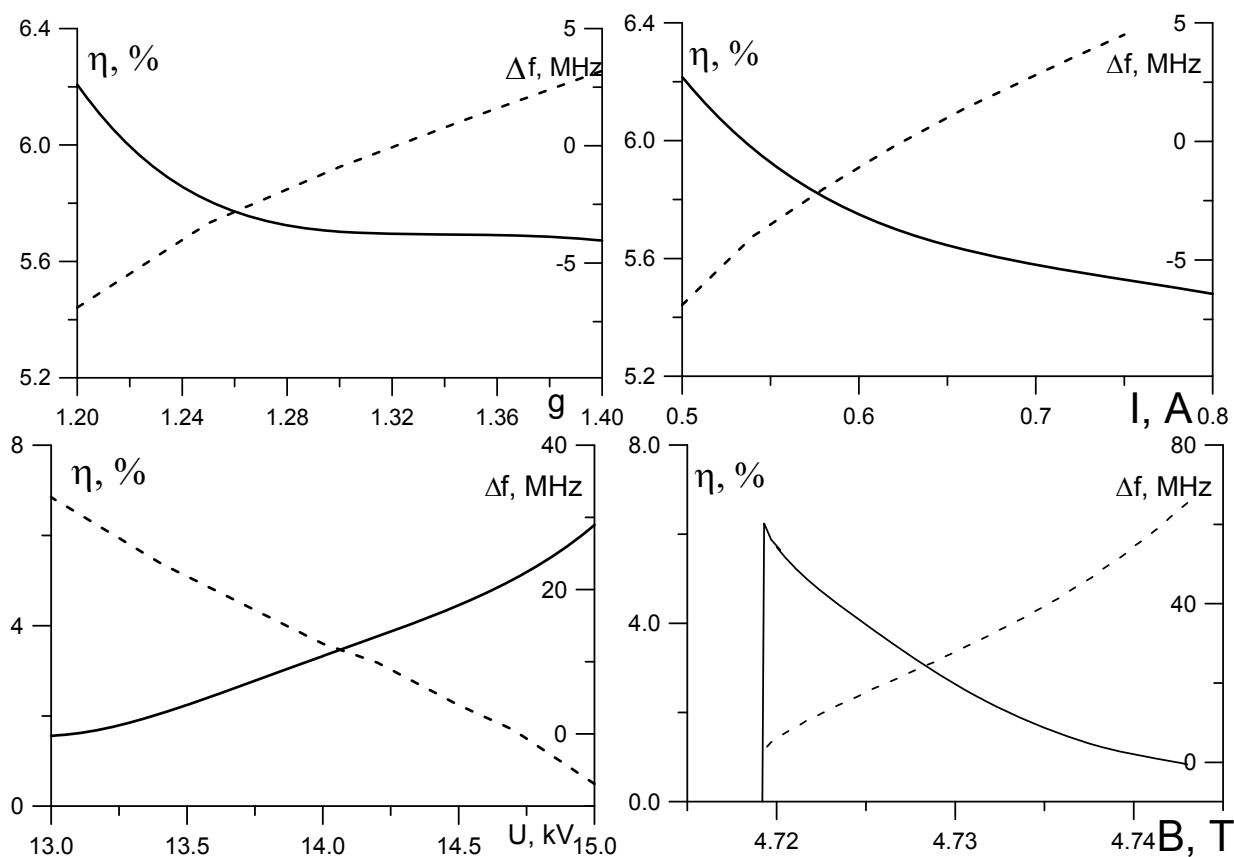


Рисунок 3.4 Зависимости КПД (сплошные линии) и расстройки частоты (или отстройки от чего)(пунктирные линии) от технических параметров гиротрона (ток, напряжение, магнитное поле) и пичч-фактора электронного пучка,) при фиксированных остальных.

Таблица 3.2. Коэффициенты пропорциональности между параметрами пучка и η , f .

| ζ_i | U_0 | I | g | B_0 |
|--------------------------------|----------------|------------|----------|--------------|
| $\partial\eta/\partial\zeta_i$ | 0,00283 %/В | - 8,49 %/А | - 10,06% | - 0,0206 %/Г |
| $\partial f/\partial\zeta_i$ | - 0,019 МГц /В | 680 МГц /А | 53МГц | 0,217 МГц /Г |

Таблица 3.3. Коэффициенты пропорциональности между отклонениями параметров источников питания и выходных параметров.

| Тип МИП | Диодный режим | Триодный режим | | Без кат. катушки | С катодной катушкой |
|---------|---------------|----------------|--|------------------|---------------------|
| | | | | | |

¹²⁵G.G. Denisov, D.A. Lukovnikov, W. Kasperek, D. Wagner // Int. J. Infrared and MM Waves, 1996. V.17. №5. P.933.

| χ_i | $U_0/U_{0,st}$ | $U_0/U_{0,st}$ | $U_a/U_{a,st}$ | I/I_{st} | $B_0/B_{0,st}$ | $B_0/B_{0,st}$ | $B_k/B_{k,st}$ |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\frac{dP/P_{st}}{d\chi_i}$ | 4.7 | 5.0 | -4.1 | 0.384 | -136.6 | -138.8 | 6.3 |
| $\frac{df/f_{st}}{d\chi_i}$ | $-1.44 \cdot 10^{-4}$ | $1.4 \cdot 10^{-3}$ | $1.9 \cdot 10^{-3}$ | $1.32 \cdot 10^{-3}$ | $3.9 \cdot 10^{-2}$ | $3.9 \cdot 10^{-2}$ | $9 \cdot 10^{-4}$ |
| $\Delta\chi_i$ | $-6.9 \cdot 10^{-2}$ | $7.1 \cdot 10^{-3}$ | $5.2 \cdot 10^{-3}$ | $7.6 \cdot 10^{-3}$ | $2.6 \cdot 10^{-4}$ | $2.6 \cdot 10^{-4}$ | $1.1 \cdot 10^{-1}$ |

где $\chi = \frac{\omega \cdot d_w}{c} \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}$, $\gamma = \frac{\varepsilon - \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}$, ε и d_w – диэлектрическая проницаемость и толщина окна соответственно, θ – бриллюэновский угол волны в выходном волноводе, ω – циклическая частота выходного излучения. Окно для данного гиротрона было изготовлено из нитрида бора (BN) с показателем преломления $n_w = 2.17$ и имело толщину $d_w = 2.14$ мм (что соответствует восьми полуволнам рабочего излучения в данном материале).

Для выбранной рабочей моды $TE_{2,3}$ наибольшую опасность представляет мода $TE_{3,1}$ на первой гармонике гирочастоты. В зоне генерации рабочей моды коэффициент отражения паразитной моды достаточно велик и равен $r_w = 0.5$.

При моделировании ситуации с отражением были рассмотрены два случая:

1) когда величина входного закритического сужения резонатора составляет величину 0.2 мм, при этом волны с рассматриваемыми частотами не могут распространяться в сторону катода,

2) когда величина входного закритического сужения резонатора составляет 0.05 мм.

На рисунке 3.5 приведены расчетные зависимости КПД генерации рабочей моды η и стартовых токов паразитной моды от магнитного поля: тонкая линия – закритическое сужение резонатора 0.2 мм, толстая линия – закритическое сужение 0.05 мм, для сравнения пунктирной линией изображен стартовый ток без учета отражения от окна. В первом случае осциллирующий характер зависимости стартового тока на рисунок 3.5 связан с изменением набега фазы

волны на расстоянии от резонатора до окна $L_{p.w}$, причем положение минимума стартового тока определяется числом продольных вариаций поля на этом участке $q \approx hL_{p.w}/\pi$, где h – продольное волновое число. Рассчитывать на подбор расстояния $L_{p.w}$ с целью достижения максимизации стартового тока паразитной моды не следует, так как положения экстремумов могут меняться при изменении параметров электронного пучка в различных режимах работы прибора, а также из-за несоответствия реальной толщины окна расчетной.

При малом входном сужении 0.05 мм осцилляции почти пропадают, так как отраженная волна свободно излучается в сторону катода. Как видно из расчетов (рисунок 3.5), при рабочем токе гиротрона 0.5 А паразитная мода еще не самовозбуждается, несмотря на существенное снижение ее стартового тока. На основании данных расчетов резонатор гиротрона изготавливался с сужением 0.05 мм.

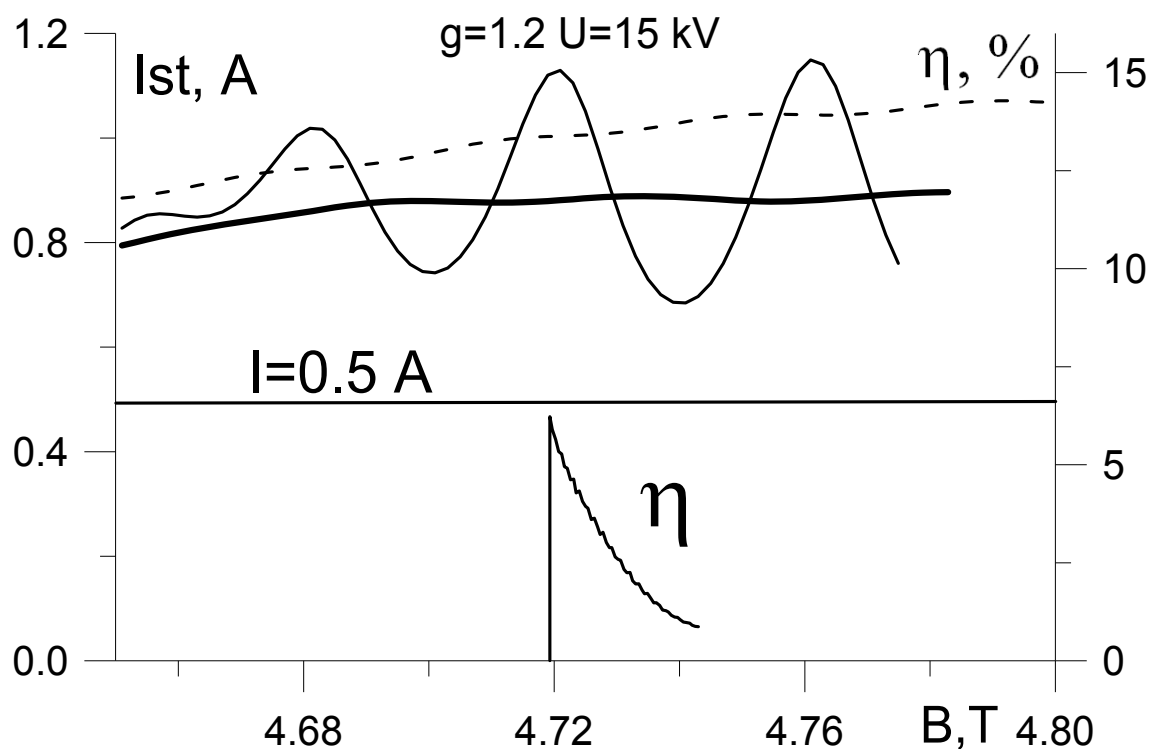


Рисунок 3.5. Зависимость КПД рабочей моды η и зависимости стартовых токов паразитной моды от магнитного поля. Пунктирная линия-стартовый ток моды $TE_{3,1}$ без отражения от окна, тонкая линия стартовый ток при учете отражения от окна и закритическим сужением

резонатора 0.2 мм, толстая линия стартовый ток при чете отражения от окна и закритическим сужением 0.05 мм

3.2 Результаты экспериментального исследования непрерывного гиротрона на второй гармонике гирочастоты

На рисунке 3.6 приведена блок-схема рассматриваемого гиротронного комплекса с указанием марок используемых приборов (за исключением тех, которые были непосредственно сделаны в ИПФ РАН). на рисунке 3.7 - фотография гиротронной лампы. Гиротрон выполнен в виде отпаянной вакуумной лампы метало-керамической конструкции с осевым выводом энергии. Для поддержания вакуумных условий использован встроенный магниторазрядный насос. Схема включения триодной магнетронно-инжекторной электронной пушки для простоты эксплуатации системы была выбрана квазидиодной: анод заземлен через высокоомный резистор. В установке использовался стабилизированный источник высокого напряжения марки HCN20000-20000 (фирма FUG Elektronik, ФРГ) с максимальными напряжением 20 кВ и током 1 А.

Резонатор сопряжен с выходным волноводом диаметром 20 мм переходом плавного профиля. Расчеты показали, что выбранный профиль обеспечивает достаточно малую (порядка 2 %) трансформацию рабочей моды в другие типы колебаний. Резонатор термически развязан от коллектора и имеет отдельную систему водяного охлаждения для обеспечения требуемой температурной стабильности. Коллектор электронного пучка гиротрона (диаметром $\varnothing=20\text{мм}$) совмещен с выходным волноводом и имеет водяное охлаждение. Между коллектором и выходным окном устанавливается постоянный магнит, формирующий поперечное магнитное поле для защиты вакуумного окна от приосевых электронов и отклонения их на стенки коллектора.

Для формирования требуемого магнитного поля использовался специально разработанный криомагнит с максимальным уровнем поля 5 Т. Расход жидкого гелия составил 0.14 л/час при выключенном токе соленоида и 0.26 л/час при токе, обеспечивающем рабочий уровень магнитного поля в резонаторе. Расход жидкого азота составил 0.16 л/час вне зависимости от режима работы.

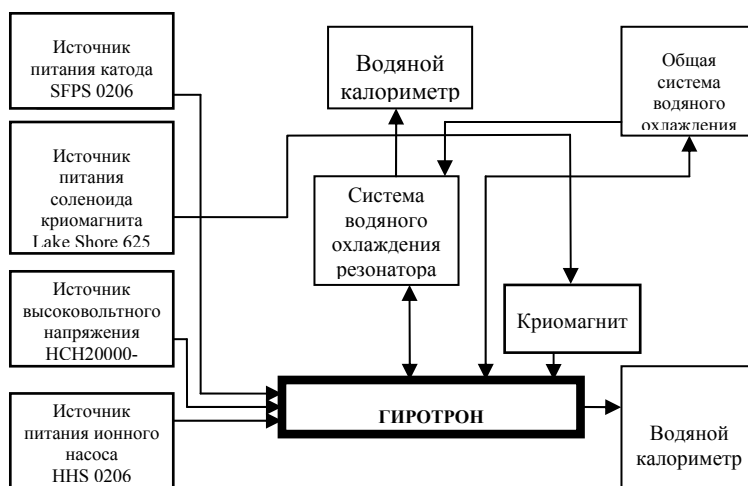


Рисунок 3.6 Блок-схема гиротронного комплекса.

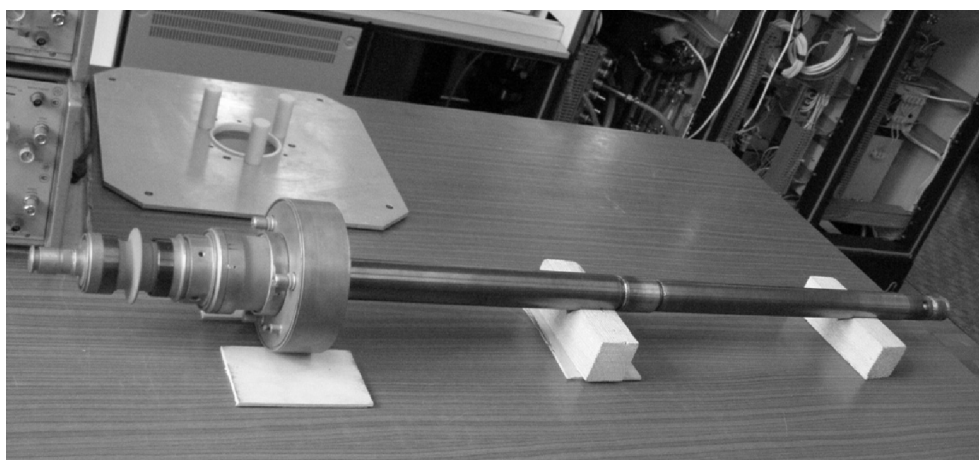


Рисунок 3.7 Внешний вид гиротрона с рабочей частотой 258 ГГц

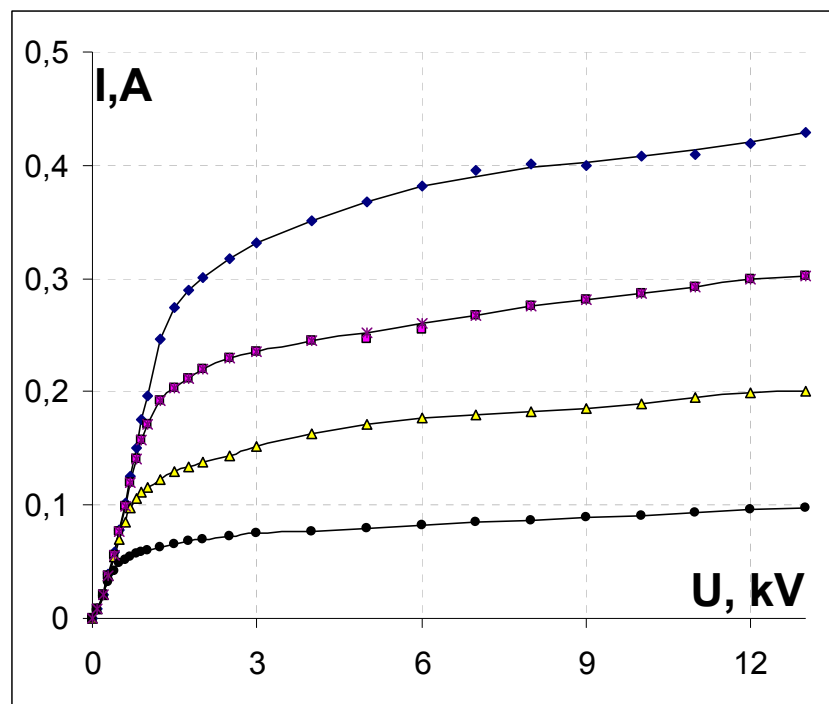


Рисунок.3.8 Семейство вольтамперных характеристик электронной пушки.

Триодная магнетронно-инжекторная пушка была спроектирована в виде металло-керамической конструкции. Эмиттер катода диаметром 10 мм выполнен на основе гексаборида лантана. Подогреватель катода изготовлен из тугоплавкой вольфрамовой проволоки. Конструкция катода оптимизирована по уровню требуемой мощности подогревателя. Керамические изоляторы между анодом и катодом, между анодом и корпусом гиротрона и для вывода накала подобраны с учетом используемых напряжений.

После изготовления и откачки гиротрона с разработанной электронной пушкой было проведено тестирование прибора и в непрерывном режиме снято семейство вольтамперных характеристик. Указанные характеристики приведены на рисунке 3.8 и на них четко видны область пространственного заряда, характерный перегиб и область сравнительно медленного нарастания тока, обусловленного эффектом Шоттки. Типичное значение мощности подогревателя в рабочих режимах составляло 60-80 Вт.

Для подстройки параметров электронного пучка изготовлена специальная катодная катушка, однако уже первые эксперименты показали нецелесообразность ее использования, поскольку для управления режимом генерации было вполне достаточно изменения анодного и/или ускоряющего напряжений. Указанный факт свидетельствует о хорошей точности изготовления отдельных элементов конструкции и юстировки лампы в магнитном поле. Лампа устанавливается в криомагните вертикально, коллектором вверх после чего малыми вертикальными перемещениями выбирается оптимальное с точки зрения КПД положение лампы в магнитном поле.

Анод, резонатор, коллектор и выходное окно гиротрона имеют отдельные контуры охлаждения и охлаждаются проточной дистиллированной водой. Расходы воды для рабочего режима (входное давление номинально 3 атм., не более 4 атм.) приведены в таблице 3.4.

Микроволновая мощность на выходе из окна, определялась с помощью водяного калориметра. На рисунке 3.10 (а) приведена зависимость мощности и

КПД генерации от тока при фиксированном напряжении 14 кВ и оптимизированных значениях магнитного поля для рабочей моды. Для каждого значения были сняты зависимости мощности излучения от магнитного поля в резонаторе, прямо пропорциональному току сверхпроводящего соленоида (зоны генерации гиротрона). На рисунке 3.10 (б) приведены несколько таких зон генерации, наложенных друг на друга. Данные зоны были построены с помощью двухкоординатного самописца при фиксированном напряжении и различных токах пучка (100-400 мА) для одного и того же интервала токов соленоида (53.5–54.2 А). На этом рисунке можно выделить зону генерации моды с одной продольной вариацией ВЧ поля (меньшие магнитные поля) и с двумя продольными вариациями ВЧ поля (большие магнитные поля). Следует отметить, что наиболее простое и быстрое управление мощностью излучения гиротронного комплекса осуществляется путем изменения ускоряющего напряжения. На рисунке 3.11 приведена зависимость мощности излучения от напряжения (модуляционная характеристика) при фиксированном токе накала катода, обеспечивающем при напряжении 13 кВ ток пучка 0.45 А. Видно, что сравнительно малые изменения напряжения позволяют эффективно управлять выходной мощностью.

Как было отмечено в предыдущих главах, при проведении оценок численных расчетов вводится эмпирический коэффициент, вдвое уменьшающий омическую добротность по сравнению со случаем резонатора из идеальной меди. Проверка правильности этого предположения и уточнение данного коэффициента была одной из основных задач проведенных экспериментов.

Мощность потерь на стенке P_{los} связана с выходной мощностью P_{out} соотношением:

$$P_{los} = \frac{Q_{dif} \cdot \alpha \cdot P_{out}}{\hat{Q}_{ohm}}. \quad (3.5)$$

где Q_{dif} -дифракционная добротность резонатора, α -рассматриваемый коэффициент. В процессе экспериментов одновременно измерялась мощность потерь в резонаторе (тепловая нагрузка) и выходная мощность гиротрона. Тепловая нагрузка на резонаторе была измерена по изменению температуры воды в системе охлаждения резонатора гиротрона при возникновении генерации. Здесь не учитывалось изменение проводимости меди из-за омического нагрева, так как изменение температуры резонатора незначительно (охлаждаемой стенки $\leq 10^\circ\text{C}$, а вакуумной стенки $\leq 30^\circ\text{C}$). Результаты измерений приведены на рисунке 3.12, где пунктирной линией представлена зависимость, использованная для теоретических оценок ($\alpha = 2$), а сплошная линия - результат усреднения экспериментальных данных, соответствующих $\alpha = 1.5$. Как видно из графика, погрешность данных измерений была достаточно велика, тем не менее, полученные результаты позволяют уверенно использовать коэффициент $\alpha = 2$ в качестве оценки сверху при проектировании будущих гиротронов.

В ходе экспериментов были сняты зоны генерации гиротрона в широких пределах по магнитному полю. На рисунке 3.13 приведены две такие кривые при различных напряжениях (15 кВ и 16 кВ), где представлены зоны генерации двух мод: левый пик соответствует моде $TE_{2,3}$, правый пик - моде $TE_{0,3}$, которая, в принципе, также может использоваться для работы. Мощности излучения на обеих модах примерно одинаковы - 150–200 Вт при напряжении 15-16 кВ и токах 0.3-0.4 А, а частоты отличаются примерно на 2 %. Как видно из рисунков, на обеих модах можно возбудить колебания с несколькими продольными вариациями поля. Причем при увеличении напряжения (то есть при уменьшении стартового тока) количество вариаций увеличивается. Данный механизм можно использовать для перестройки частоты, однако в этом случае процесс оптимизации резонатора и особенности конструкции широкополосного гиротрона должны несколько отличаться (см. раздел 2.2 диссертации) от реализованного варианта, основной целью которого была долговременная стабильная работа.

Таблица 3.4 Расход воды в системе охлаждения для различных узлов гиротронного комплекса

| Узел | калориметр | анод | резонатор | окно | Коллектор |
|------------------------|------------|------|-----------|------|-----------|
| Расход воды (л/мин) | 1.88 | 2.8 | 6 | 3 | 9 |

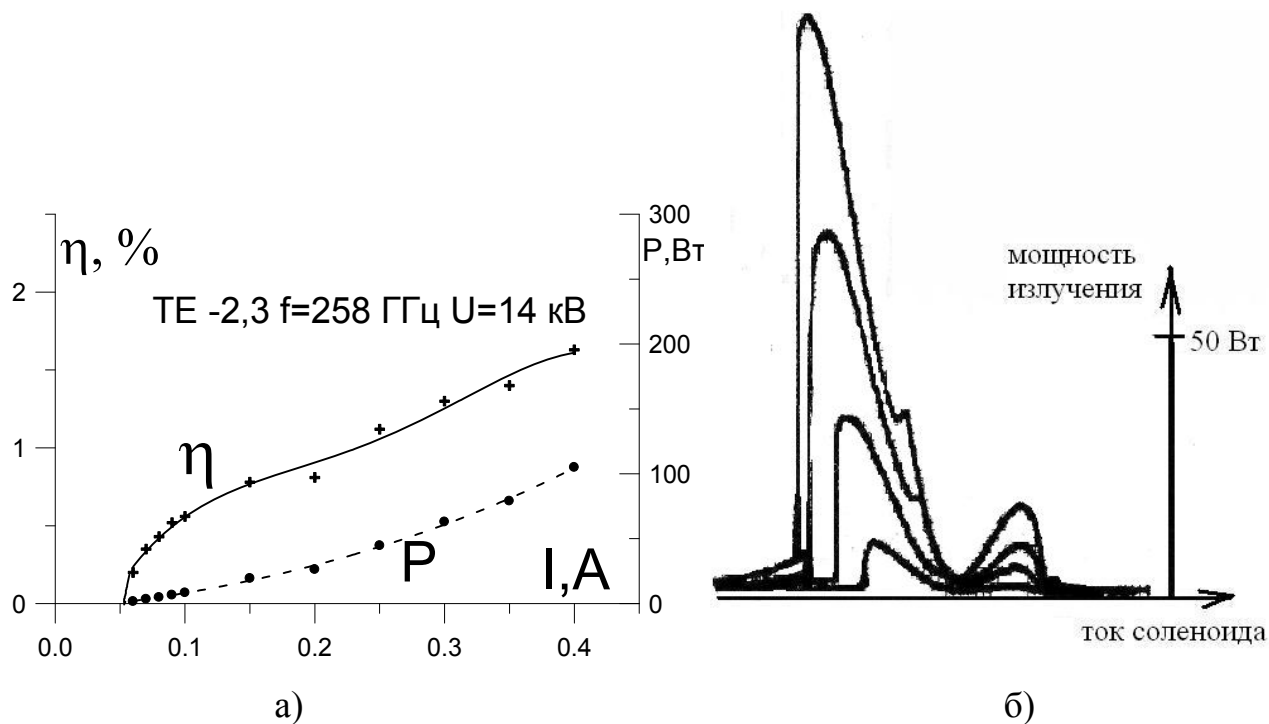


Рисунок 3.9. КПД и мощность излучения рабочей моды (а) а также зоны генерации (б) в зависимости от тока электронного пучка при фиксированном ускоряющем напряжении

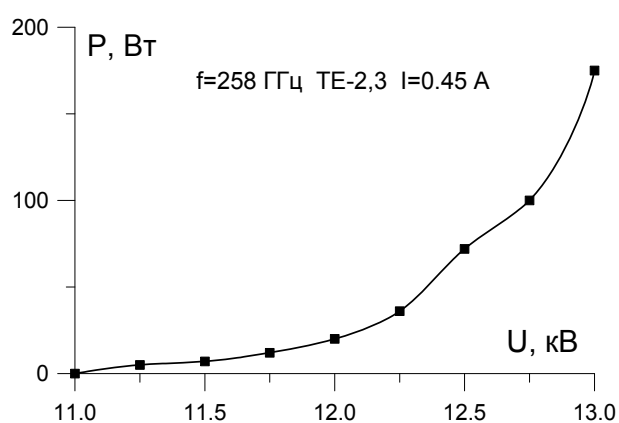


Рисунок 3.11 Модуляционная характеристика для рабочей моды $TE_{2,3}$ при токе 0.45 А

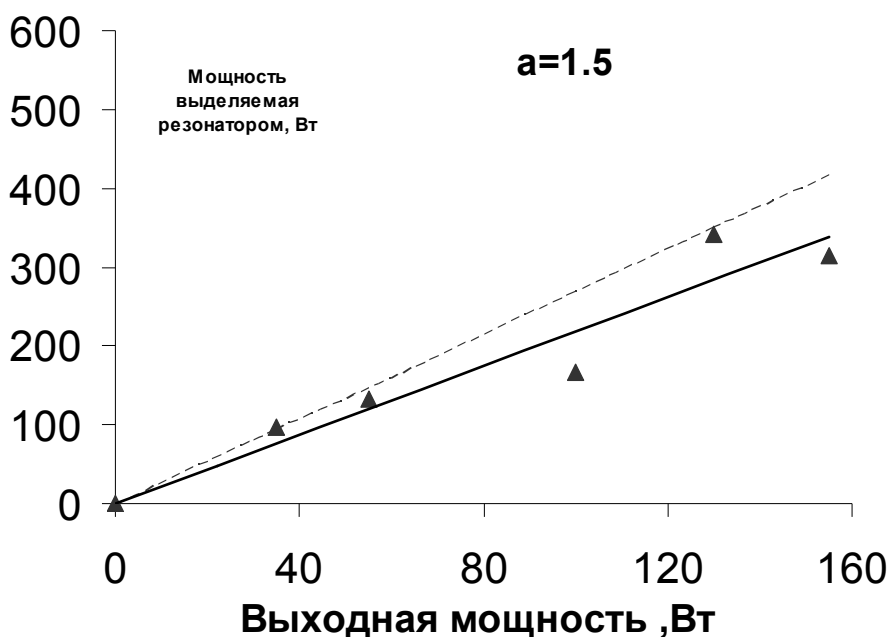


Рисунок 3.12. Зависимость мощности омических потерь в резонаторе от выходной мощности (пунктирная линия - теоретический расчет для случая $\alpha = 2$)

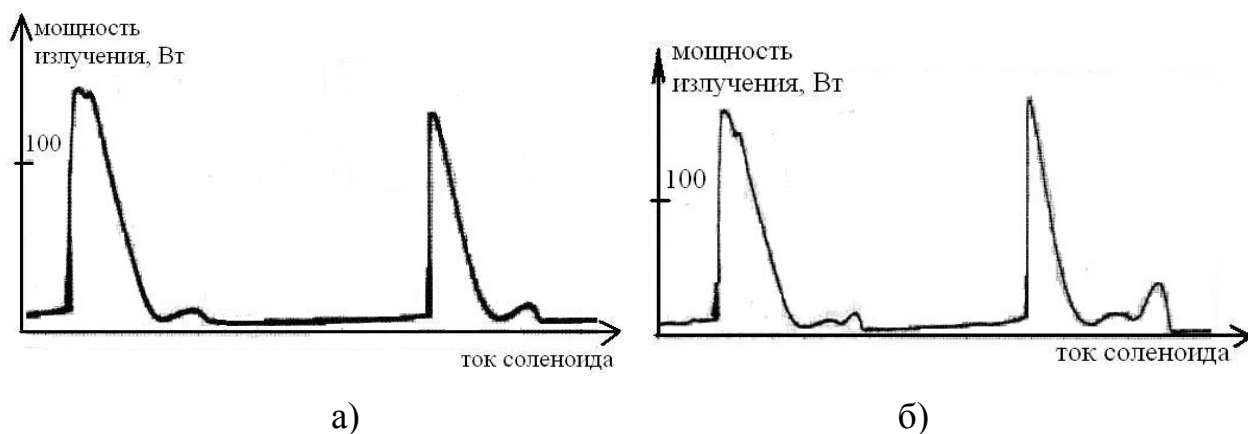


Рисунок 3.13 Зоны генерации по магнитному полю при напряжениях 15 кВ а) и 16 кВ б) и токе 0.3 А.



Рисунок 3.14. Поперечная структура поля на выходе из окна гиротрона для некоторых мод ($TE_{-2,3}$, $TE_{4,2}$, $TE_{0,3}$).

В ходе экспериментов с помощью термобумаги была зафиксирована поперечная структура ВЧ-поля на выходе из окна гиротрона. На рисунке 3.14 приведены структуры полей мод $TE_{-2,3}$, $TE_{4,2}$ и $TE_{0,3}$. Как видно из рисунка, все они имеют характер (в азимутальном направлении) стоячей волны. Это означает, в частности, что рабочей точке имеет место возбуждение суперпозиции волн с противоположным вращением $TE_{-2,3}$ и $TE_{2,3}$. При этом остается открытым вопрос о том, генерируется ли стоячая мода непосредственно в резонаторе, из-за несоосности электронного пучка и резонатора¹²⁶, азимутальной несимметрии катода и неоднородности эмиссии¹²⁷, нарушения аксиальной симметрии резонатора¹²⁸ или мода с противоположным вращением возникает на участке после резонатора в результате переизлучения основной моды. К переизлучению, в частности, может приводить изгиб лампы и отличие поперечного профиля выходного волноводного перехода от круглого.

Частотные измерения, выполненные гетеродинным методом, показали близость частоты генерации к проектному значению. Уточненные измерения частоты проводились методом электронно-спинового резонанса на ЯМР-спектрометре в Институте биофизической химии университета Франкфурта на Майне (ИБФХ) и дали значение 0.2589205 ТГц. Измерения долговременной относительной нестабильности мощности и частоты гиротрона в ИБФХ показали, что они не превышают 1% и $5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Экспериментально было установлено, что изменение температуры резонатора с

¹²⁶T. Idehara, K. Shibutani, H. Nojima, M. Pereyaslavets, K. Yoshida, I. Ogawa and T. Tatsukawa. Study of Electron Beam Misalignment in a Submillimeter Wave Gyrotron // Int. J. Infrared and MM Waves, 1998. V.19. №10. P.1303.

¹²⁷G. S. Nusinovich, A. N. Vlasov, M. Botton, T. M. Antonsen, S. Cauffman, K. Felch Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // Physics of Plasmas 2001 V. 8, № 7

¹²⁸Нусинович Г.С., Конкуренция мод в гиромонотроне с нарушенной аксиальной симметрией // Радиотехника и электроника 1974 Т.19 №8 с.1788-1790

помощью регулировки температуры охлаждающей воды позволяет в некоторых пределах перестраивать частоту генерации на уровне 4 МГц/градус, что согласуется с теоретическими оценками.

3.3 Анализ полученных экспериментальных данных.

Были обнаружены два существенных несоответствия между экспериментальными данными и результатами предварительного численного моделирования, а именно:

1. Поперечная структура рабочей моды $TE_{2,3}$, а также соседней (паразитной) моды $TE_{4,2}$ на выходе из окна гиротрона имеет стоячую в азимутальном направлении структуру, то есть является суперпозицией волн с различными направлениями вращения ($TE_{2,3}$ и $TE_{-2,3}$) и соразмерными амплитудами.

2. Мода $TE_{0,3}$ при расчетных параметрах электронного пучка имела достаточно большую мощность генерации, хотя теоретически стартовые условия для нее не были соблюдены (при расчетных параметрах ее стартовый ток превышал рабочий приблизительно в 7 раз).

Данные несоответствия могут быть вызваны различными причинами, которые можно условно разделить на две группы. Первая группа связана с отклонениями электродинамической структуры гиротрона от теоретической, в том числе эллиптичностью сечения резонатора, различного рода дефектами в резонаторе или в выходном переходе, которые могли привести к переизлучению рабочей моды. Однако эти эффекты при высоком технологическом уровне изготовления лампы не объясняют генерацию моды $TE_{0,3}$ с наблюдаемым уровнем мощности. В данном разделе обсуждается вторая группа эффектов, связанная с отклонениями параметров электронного пучка, а именно отклонение радиуса ведущих центров электронных орбит от расчетного значения и несоосность пучка и резонатора. Отметим, что к наблюдаемым несоответствиям может привести совокупность различных эффектов, в том числе и не обсуждаемых в данной главе.

При проектировании гиротрона радиальную координату ведущих центров электронных орбит в пучке (в дальнейшем радиус пучка) подбирали таким образом, чтобы минимизировать стартовый ток рабочей моды. Рассмотрим ситуацию, когда радиус пучка немного отличается от оптимального для

рабочей моды (т.е. случай, когда изменение много меньше длины волны) и связь пучка с рабочей модой спадает относительно слабо. Однако связь пучка с паразитными модами может увеличиться существенно, и стартовые токи паразитных мод станут меньше рабочих, что приведет к относительно высокому уровню генерации паразитного излучения. Применительно к рассматриваемому гиротрону, на рисунке 3.15 приведены зависимости G_{mp} -факторов от радиуса пучка для мод $TE_{2,3}, TE_{-2,3}, TE_{0,3}$. Как видно из рисунка, при радиусе пучка 0.75-0.8 мм G_{mp} -факторы всех трех мод, оказываются приблизительно равными и достаточными для возникновения исследуемых эффектов.

При этом изменении радиуса пучка мы перейдем из режима генерации моды $TE_{-2,3}$ в режим генерации моды $TE_{2,3}$ (рисунок 3.16). Следует отметить, что в окрестности переходной точки (радиус пучка около 0.8 мм) наблюдался эффект гистерезиса, то есть влияние отношения начальных амплитуд мод и направления изменения R_0 на то, какая из мод устанавливается в результате конкуренции.

Другой причиной, которая может привести к увеличению G_{mp} -фактора паразитных мод, является уже рассматриваемая нами в п. 1.2 взаимная несоосность электронного пучка и резонатора (например, вследствие плохой юстировки лампы или перекоса соленоида в криостате). При этом система перестает быть аксиально-симметричной и может возникнуть связь между модами разного вращения (образование стоячей волны).

На рисунке 3.17 приведены зависимости G_{mp} -факторов для мод $TE_{2,3}, TE_{-2,3}, TE_{0,3}$ от величины dR . Значения dR больше 0.5 мм не рассматривались, так как такой пучок, с учетом его расплывания и паразитной эмиссии вне эмиттирующего пояса, не смог бы пройти в резонатор без частичного оседания на электродинамическую систему. Как видно из рисунка, при несоосности порядка 0.3-0.4 мм может возникнуть как совместная генерация

мод $TE_{2,3}, TE_{-2,3}$ так и генерация моды $TE_{0,3}$ с достаточной мощностью. На рисунке 3.18 приведены результаты численного моделирования взаимодействия мод $TE_{-2,3}$ и $TE_{2,3}$, в частности парциальные КПД данных мод в установившемся состоянии, в зависимости от величины несоосности, а также общий КПД. На рисунке 3.19 приведен КПД моды $TE_{0,3}$ в зависимости от величины несоосности. Как видно, в интересующей нас области 0.3-0.4 мм не только устанавливается двухмодовая генерация $TE_{2,3}, TE_{-2,3}$, но и генерирует мода $TE_{0,3}$, причем мощности данных генераций приблизительно равны и хорошо согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, результаты эксперимента можно объяснить наличием несоосности электронного пучка и резонатора.

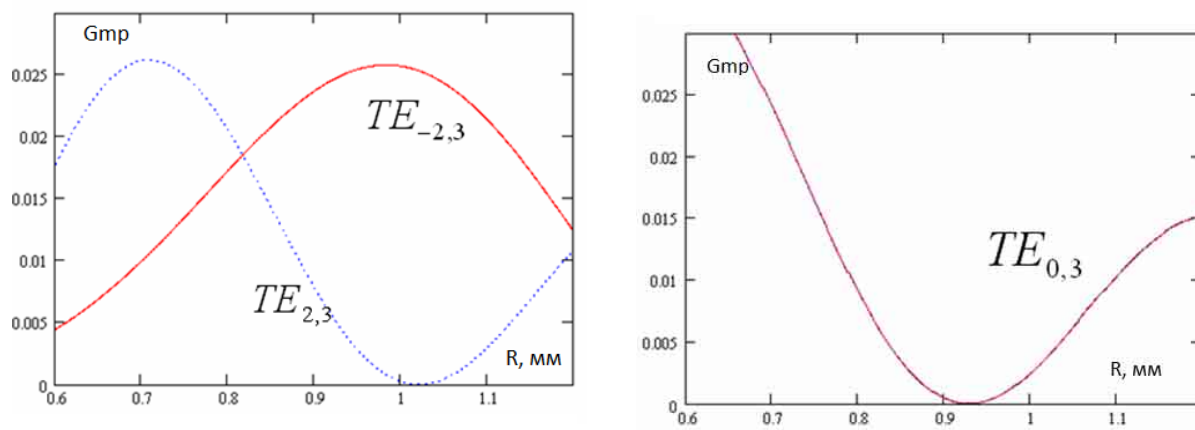


Рисунок 3.15. зависимость G_{mp} -факторов от радиуса пучка для мод $TE_{2,3}$, $TE_{-2,3}$, $TE_{0,3}$

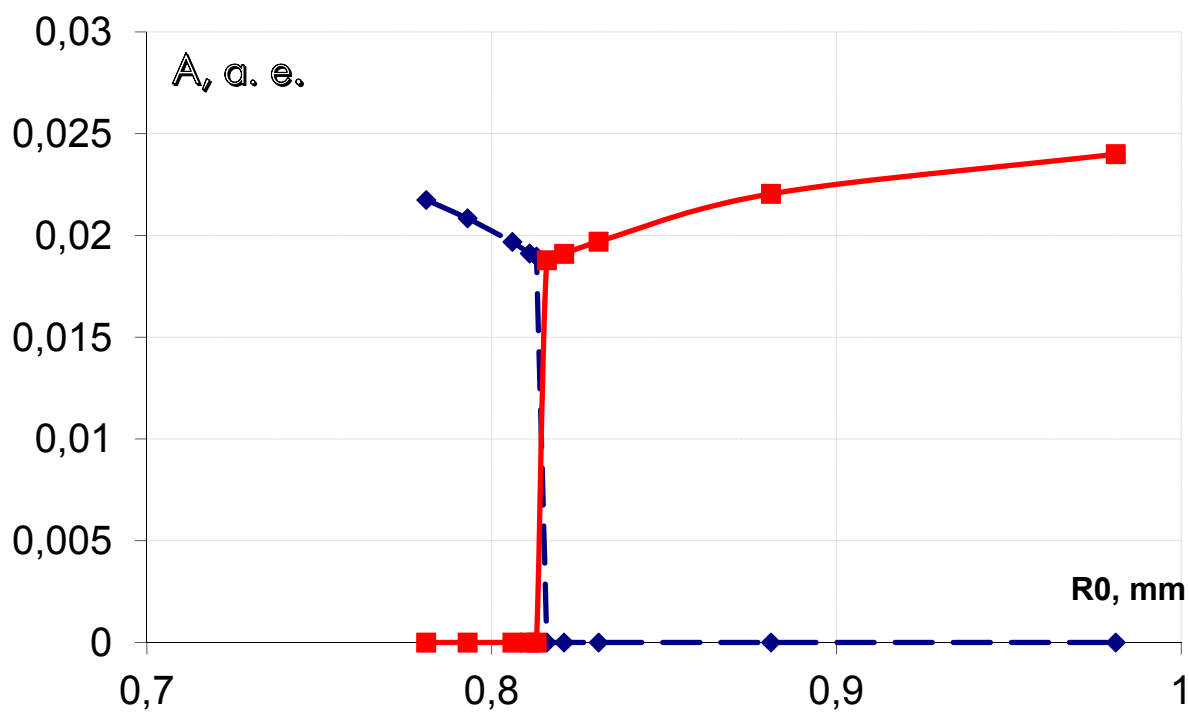


Рисунок 3.16. Установившиеся амплитуды мод $TE_{-2,3}$ (значки "■") и $TE_{2,3}$ (значки "◆") в зависимости от радиуса электронного пучка.

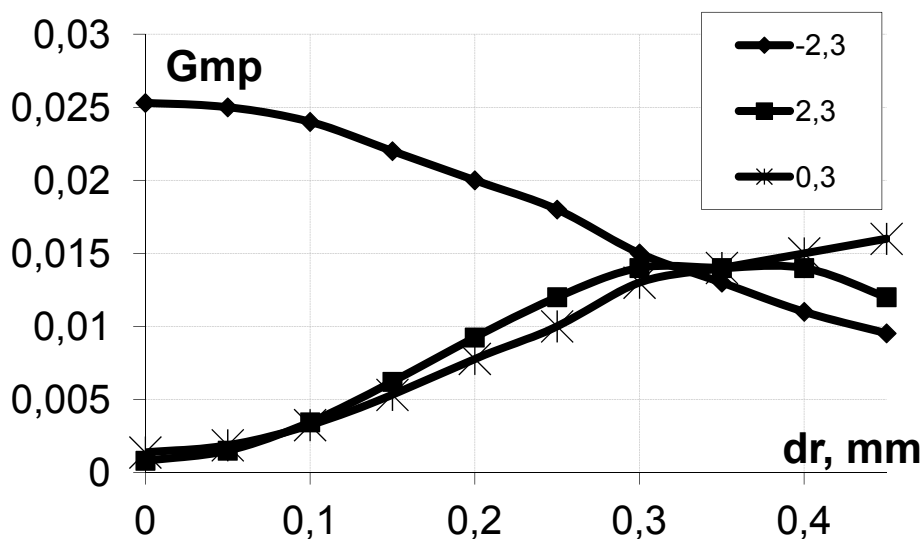


Рисунок 3.17 Зависимости G_{mp} -факторов для мод $TE_{2,3}$, $TE_{-2,3}$, $TE_{0,3}$ от величины несоосности электронного пучка и резонатора.

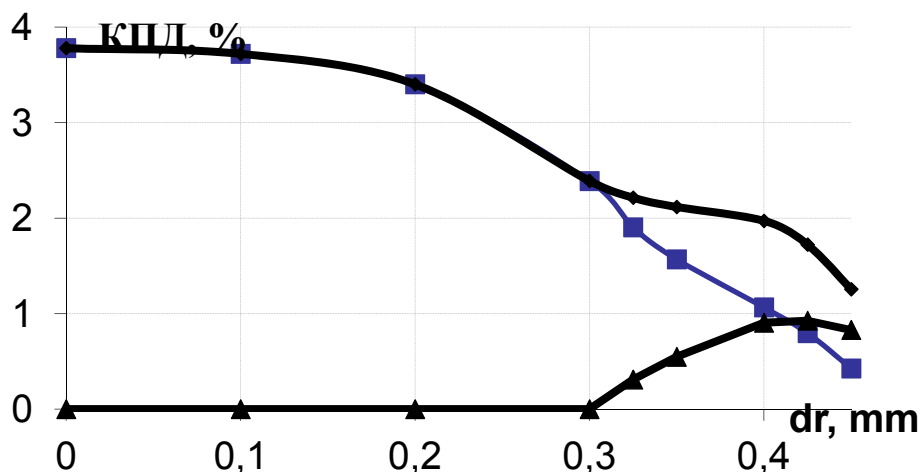


Рисунок 3.18. Расчетный КПД мод $TE_{-2,3}$ (значки "■") и $TE_{2,3}$ (значки "▲") мод и суммарный КПД.

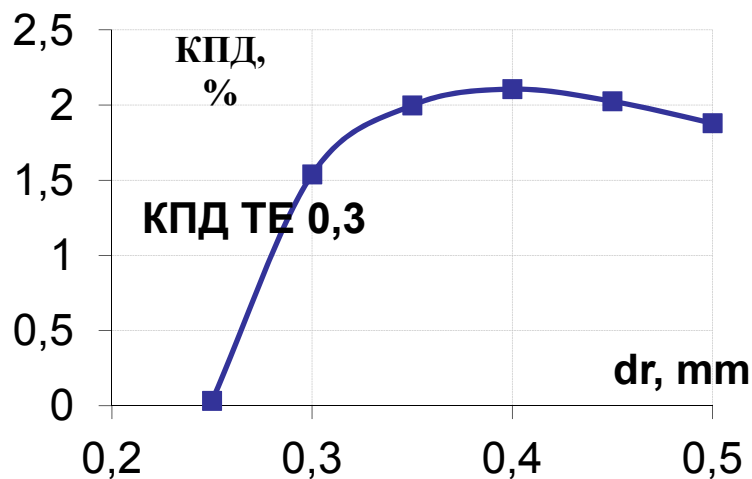


Рисунок 3.19. Расчетный КПД симметричной моды $TE_{0,3}$.

Заключение. В данной главе были рассмотрены вопросы, связанные с проектированием и оптимизацией маломощного непрерывного гиротрона на частоте 0.25 ТГц, работающего на второй циклотронной гармонике. В процессе оптимизации были выбраны оптимальные по КПД параметры электродинамической системы. Обсуждены меры по поддержанию мощности (КПД) и частоты гиротрона в заданных пределах, а также связанные с этим требования к источникам питания гиротронного комплекса. Рассмотрены эффекты смещения электронного пучка в резонаторе, а также отражение сигнала от окна, а также определены требования к изготовлению резонатора.

В ходе экспериментов на установке с данным гиротроном была получена максимальная мощность излучения 180 Вт при КПД 3.7 %. Были измерены частота генерации, а также была зафиксирована генерация соседних мод и сняты их зоны генерации.

Измеренные значения омической добротности резонатора свидетельствуют об адекватности введения эмпирического коэффициента, учитывающего шероховатость поверхности. Получена генерация мод с различным числом продольных вариаций поля в резонаторе, что показывает возможности расширения диапазона непрерывной и ступенчатой электронной перестройки частоты. Получены изображения поперечной структуры выходного излучения, которые показывают, что из окна гиротрона выходит стоячая по азимуту волна.

На основе полученных данных был обсужден ряд эффектов, которые могли привести к несоответствию экспериментальных результатов и первоначальных расчетов. Показано, что несоосность пучка и резонатора с величиной 0.3-04 мм может объяснить наблюдаемые в эксперименте эффекты, в частности, совместную генерацию мод $TE_{2,3}$ и $TE_{-2,3}$ (образование стоячей волны), а также генерацию паразитной моды $TE_{0,3}$ на наблюдаемом в эксперименте уровне. При этом данные расчетов и результаты экспериментов согласуются.

Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 0.263 ТГц НА ПЕРВОЙ ГАРМОНИКЕ ГИРОЧАСТОТЫ

С появлением криоманитов с индуктивностью поля до 15 Тл, не требующих заливки жидким гелием, стало возможно создание нового поколения микроволновых комплексов для спектроскопических задач на базе гиротронов, работающих на основном циклотронном резонансе. Переход к работе на первой гармонике существенно упрощает проблему селекции рабочего типа колебаний и позволяет рассчитывать на достижение рекордных значений мощности излучения. В ИПФ РАН был создан гиротрон с рабочей частотой 0.263 ТГц, работающий на первой гармонике гирочастоты. При его разработке были учтены проблемы, выявленные в предыдущих экспериментах и сделан ряд нововведений. В данной главе описываются результаты оптимизации узлов гиротрона для данного комплекса¹²⁹¹³⁰, а также данные, полученные при проведении экспериментов¹³¹¹³².

¹²⁹ М.Ю. Глявин, Н.А. Завольский, В.Е. Запезалов, В.Ю. Заславский, К.А. Лещева, Р.М. Розенталь, А.С. Седов Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцового диапазона // Изв. ВУЗов «Прикладная нелинейная динамика» т. 23, № 2, 2015 Стр. 108-118.

¹³⁰ М.Ю. Глявин, Г.Г.Денисов, В.Е. Запезалов, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, А.С. Седов, В.В. Холопцев, А.В. Чирков Особенности оптимизации подсистем непрерывного гиротрона с частотой генерации 0,26 ТГц на основном циклотронном резонансе // Изв. ВУЗов Радиофизика Т.58 №9 стр.720-731

¹³¹ M.Yu. Glyavin, A.V.Chirkov, G.G.Denisov, A.P.Fokin, V.V.Kholoptsev, A.N.Kuftin, A.G.Luchinin, G.Yu.Golubyatnikov, V.I.Malygin, M.V.Morozkin, V.N.Manuilov, M.D.Proyavin, A.S.Sedov, E.V.Sokolov, E.M.Tai, A.I.Tsvetkov, V.E.Zapevalov Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // Rev. Sci. Instr., 86(5), 054705, 2015

¹³² А.И.Цветков, М.В.Морозкин, М.Ю.Глявин, В.И.Малыгин, Л.В.Лубяко, Г.Ю.Голубятников, А.Н.Куфтин, В.Е.Запезалов, А.С.Седов, А.В.Чирков, А.П.Фокин, В.В.Холопцев, А.Г.Еремеев, Е.В.Соколов, Г.Г.Денисов Автоматизированный микроволновый комплекс на основе

4.1 Требования к гиротрону и его конструктивные особенности. Оценка параметров электронного пучка и оптимизация электронно-волнового взаимодействия

Параметры криомагнита JASTEC 10T100 под которые оптимизировался данный гиротрон и в частности его электронно-оптическая система (ЭОС) следующие:

| | |
|--|-------------|
| Максимальное магнитное поле | $B_0=10$ Тл |
| Диаметр теплового отверстия | 100 мм |
| Высота корпуса соленоида | 475 мм |
| Длина однородного участка поля по уровню 0.2 % | 18 мм. |
| Длина однородного участка поля по уровню 0.5 % | 28 мм. |

Электронно-оптическая система¹³³¹³⁴ должна обеспечить следующие параметры пучка в резонаторе при заданных технических параметрах источников: рабочее магнитное поле $B_0=9.5788$ Тл, ускоряющее напряжение $U_0=15$ кВ, ток пучка $I_b=0.2$ А, радиус ведущего центра $R_0=0.9643$ мм, питч-фактор $g=1.3$.

На выбор рабочей моды в гиротроне, работающем в условиях основного гирорезонанса, не налагаются такие серьезные ограничения, как в случае использования высших гармоник. Тем не менее, с одной стороны радиус пучка должен быть достаточно большим для того чтобы его можно было сформировать в магнетронно-инжекторной пушке, сохранив приемлемый радиус эмиссионного кольца. С другой стороны, диаметр теплового отверстия криомагнита и использование маломощных источников питания не позволяет

работающего в непрерывном режиме гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц и выходной мощностью 1 кВт Изв. ВУЗов Радиофизика Т.58 №9 С.709-719.

¹³³ Цимринг Ш.Е. Формирование винтовых электронных пучков. // Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров). Кн. 4. Саратов: СГУ, 1974, С. 3-94.

¹³⁴ Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков // Нижний Новгород, Институт прикладной Физики РАН, 2012 -576 с.

использовать моды с высокой сверхразмерностью, которые наиболее привлекательны из-за меньшей доли омических потерь в резонаторе.

В проведенных ранее экспериментах с 0.258 ТГц гиротроном излучение на выходе из окна имело структуру стоячей волны с четырьмя вариациями в азимутальном направлении¹³⁵. Кроме детально рассмотренного в третьей главе эффекта несоосности пучка и резонатора существуют и другие причины возникновения такого эффекта, в том числе отличие сечения резонатора и волноводного перехода от идеально круговой формы. Как было отмечено в первой главе, критичность к данному эффекту убывает с ростом азимутального индекса рабочей моды, так как для образования стоячей волны необходимо существенное содержание гармоники, соответствующей данному индексу в разложении поперечного профиля резонатора в ряд Фурье.

Суммируя вышеизложенные соображения, а также учитывая данные по оптимизации электронной пушки, в качестве рабочей моды была выбрана мода $TE_{5,3}$ с радиусом ведущих центров электронных орбит электронного пучка 0.93 мм. Спектр собственных мод резонатора в окрестности рабочей моды приведен на рисунке 4.1. Высота линий на этом спектре пропорциональна структурному фактору, характеризующему связь моды TE_{np} и электронного пучка.

Результаты оптимизации КПД гиротрона в зависимости от длины резонатора для ускоряющего напряжения 15 кВ, тока пучка 0.1 А, пичч-фактора 1.3 приведены на рисунке 4.2. Как видно из результатов расчетов, при указанных параметрах пучка КПД достигает 20 %, что соответствует генерируемой мощности 300 Вт на выходе из резонатора. При проектировании аналогичного прибора повышенного уровня мощности, КПД можно существенно увеличить, уменьшив длину резонатора, но увеличивая соответствующим образом ток пучка. Например, при токе около 0.7 А КПД

¹³⁵ Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запезалов В.Е. и др. //Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т.53. №4. С.260.

достигает 35 %. Соответствующие результаты также приведены на рисунке 4.2. В этом случае в оптимальном режиме кроме повышения электронного КПД снижается отношение дифракционной добротности к омической (рисунок 4.3) и, следовательно, величина потерь в стенках резонатора. Следует отметить, что поскольку данный гиротрон планируется использовать в различных режимах работы, длина резонатора была выбрана несколько больше оптимальной для обоих рассмотренных выше проектных режимов, чтобы обеспечить эффективное возбуждение рабочей моды и при сравнительно низком (порядка 10 мА) токе. Это в перспективе позволит использовать маломощные источники питания для тех приложений, в которых необходимый уровень выходной мощности составляет несколько десятков ватт. КПД гиротрона в зависимости от магнитного поля для напряжения 15 кВ и тока 0.4 А представлен на рисунке 4.4

На рисунке 4.5 приведены результаты расчета КПД в зависимости от питч-фактора электронного пучка при прочих фиксированных технических параметрах и длине цилиндрической части резонатора 20 мм. Как видно из рисунка, гиротрон может эффективно работать в широком диапазоне значений питч-фактора.

При выбранной геометрии резонатора (длина 20 мм и угол выходного раскрытия 1°) расчетная доля омических потерь составляет около 35 % от мощности, отбираемой у пучка.

Таблица 4.1. Основные параметры МИП 0.26 ТГц гиртрона на первой гармонике
гирочастоты

| | |
|---|----------------------------|
| Компрессия магнитного поля | $\alpha=26.6$ |
| Расстояние от центра эмиттера до центра магнитной системы | $Lz=354$ мм |
| Анодное напряжение | $Ua=15$ кВ |
| Электрическое поле на катоде | $Ek=4$ кВ/мм |
| Радиус катода | $Rk=5$ мм |
| Зазор анод-катод | $d=5$ мм |
| Ширина эмиттера | $L=0.8$ мм |
| Плотность тока | $jk=0.8$ А/см ² |

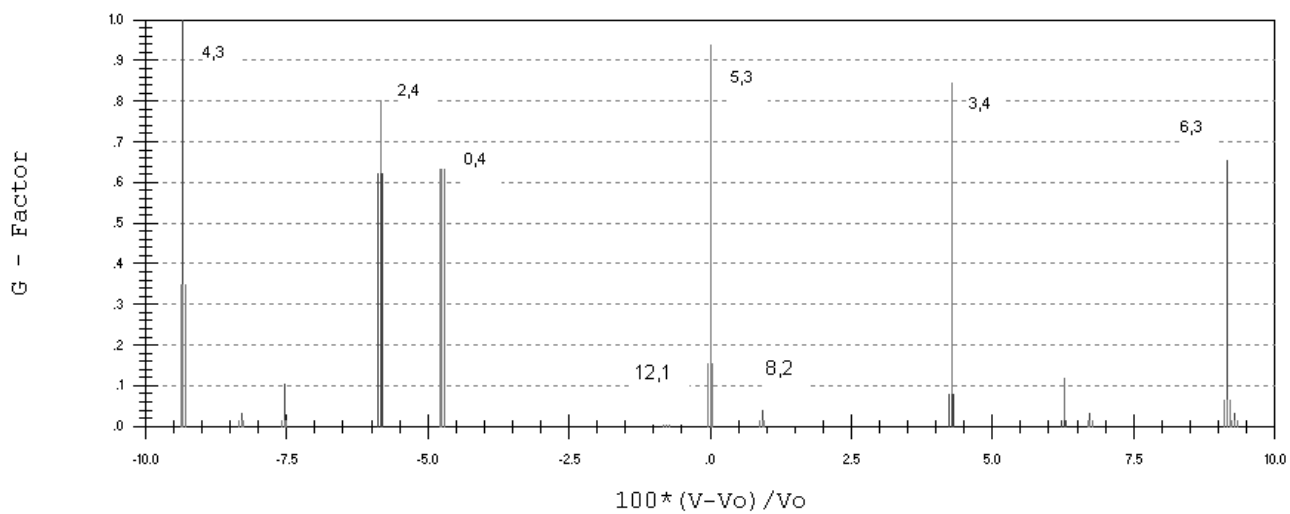


Рисунок 4.1 Спектр собственных мод резонатора около рабочей моды.

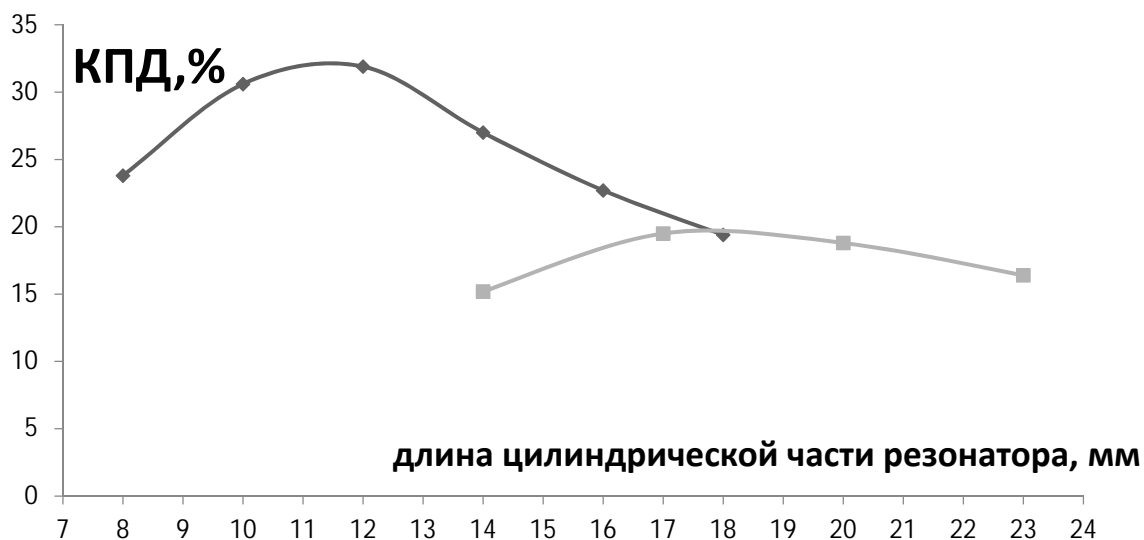


Рисунок 4.2. Зависимость волнового КПД 263 ГГц гиротрона с модой $TE_{5,3}$ от длины цилиндрической части при ускоряющем напряжении 15 кВ, и питч-факторе $g=1.3$ для тока пучка $I=0.1$ А (серая линия) и тока пучка $I=0.7$ А (черная линия)

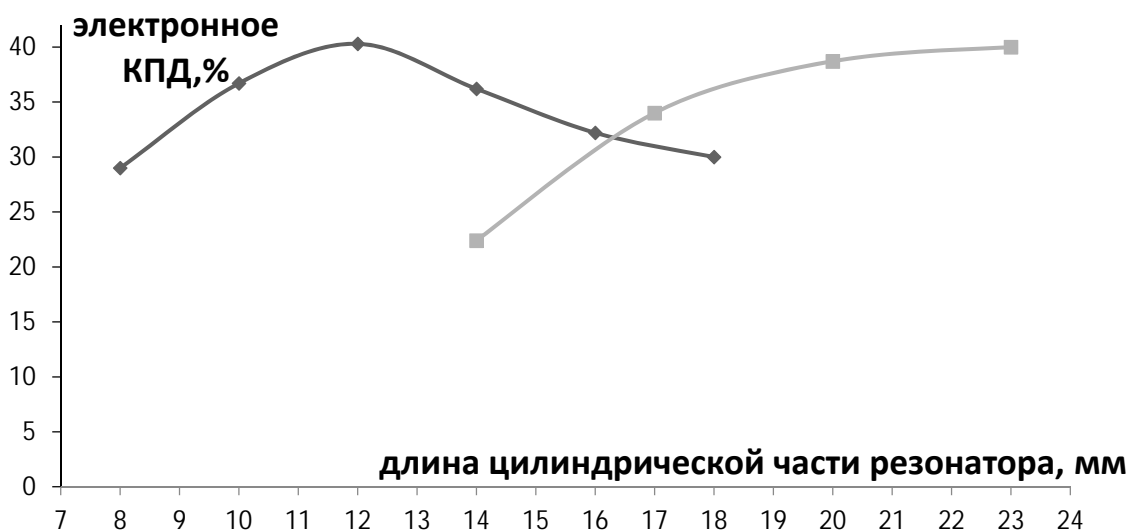


Рисунок 4.3 Зависимость электронного КПД 263 ГГц гиротрона с модой $TE_{5,3}$ от длины цилиндрической части при ускоряющем напряжении 15 кВ, и питч-факторе $g=1.3$ для тока пучка $I=0.1$ А (серая линия) и тока пучка $I=0.7$ А (черная линия)

Как было показано в литературе¹³⁶¹³⁷ и проиллюстрировано в предыдущих главах диссертации, эффекты, связанные с нарушением аксиальной симметрии могут существенно влиять на режим работы прибора. Это может привести к уменьшению КПД прибора или даже к переходу на генерацию другой рабочей моды или совокупности мод. С этой целью на этапе разработки было проведено исследование влияния несоосности пучка и резонатора на режим работы проектируемого гиротрона.

Моделирование выполнялось как в рамках традиционного подхода, базирующегося на усредненных уравнениях, так и с использованием трехмерных PIC (particle-in-cells) кодов CST Studio Suite¹³⁸ (далее CST) и KARAT¹³⁹.

Результаты моделирования стационарных режимов генерации исследуемого гиротрона в рамках усредненных уравнений, и описанными выше PIC-кодами в случае несмещенного пучка с оптимальным радиусом центров электронных орбит представлены на рисунке 4.6. Следует отметить совпадение найденных значений максимального КПД генерации для всех методов расчета и экспериментальных данных, подробно описанных в следующем разделе диссертации. Определенные различия наблюдаются в точках, соответствующих неоптимальным по КПД режимам генерации, то есть при отстройке магнитного поля от оптимального значения. Выяснение этих причин требует дополнительного исследования.

¹³⁶ *Dumbrajs O.* Eccentricity of the electron beam in a gyrotron cavity // Int. J of Infrared and MM Waves, 1994, v.15, no.7, p.1255-1262

¹³⁷ *Khutoryan E.M., Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Idehara T.* Theoretical Study of the Effect of Electron Beam Misalignment on Operation of the Gyrotron FU IV A IEEE Trans. on Plasma Science, 2014, V.42, no.6, 1586-1593

¹³⁸ Сайт программного продукта CST Studio Suite https://www.cst.com/Products/CSTS2_ (дата обращения 02.02.2015)

¹³⁹ *Тараканов В.П.* Универсальный электромагнитный код KARAT // Математическое моделирование. Проблемы и результаты М., Наука, 2003 С. 456-476.

В рамках одномодового приближения наблюдается снижение эффективности генерации при отстройке магнитного поля от оптимального значения в силу изменения фактора связи между волной и пучком.

В первом приближении для оценки снижения КПД можно использовать простую модель, введя эффективный фактор связи и проведя усреднение факторов связи для каждой азимутальной фракции по угловой координате. Радиус пучка для каждой азимутальной фракции можно выразить следующим образом: $R_0 = R_{00} + d \cdot \cos(\psi)$, где R_{00} – радиус несмещенного пучка, d – расстояние от оси пучка до оси резонатора (величина смещения).

В итоге эффективный фактор связи будет иметь вид:

$$G_{mp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{J_{m-n}^2(v_{mp}(R_{00} + d \cdot \cos(\psi))/R_p) d\psi}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)} \quad (4.1)$$

В практически важных случаях смещение пучка мало, что позволяет разложить функцию Бесселя под интегралом в ряд по величине $v_{mp} \cdot d/R_p$. При этом так как невозмущенный пучок соответствует максимуму функции Бесселя, первым ненулевым членом разложения будет квадратичный

$$J_{m-n}(v_{mp}(R_{00} + d \cdot \cos(\psi))/R_p) \cong J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p) + \frac{\alpha}{2} \cos^2(\psi)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{J_{m-n-2}(v_{mp}R_{00}/R_p) - 2J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p) + J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p)}{4} (v_{mp}d/R_p)^2$$

После интегрирования в выражение для эффективного фактора связи примет вид:

$$G_{mp} = G_{mp0} \left(1 + \frac{\alpha}{2J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p)} \right) \quad (4.2)$$

где G_{mp0} - фактор связи несмещенного пучка.

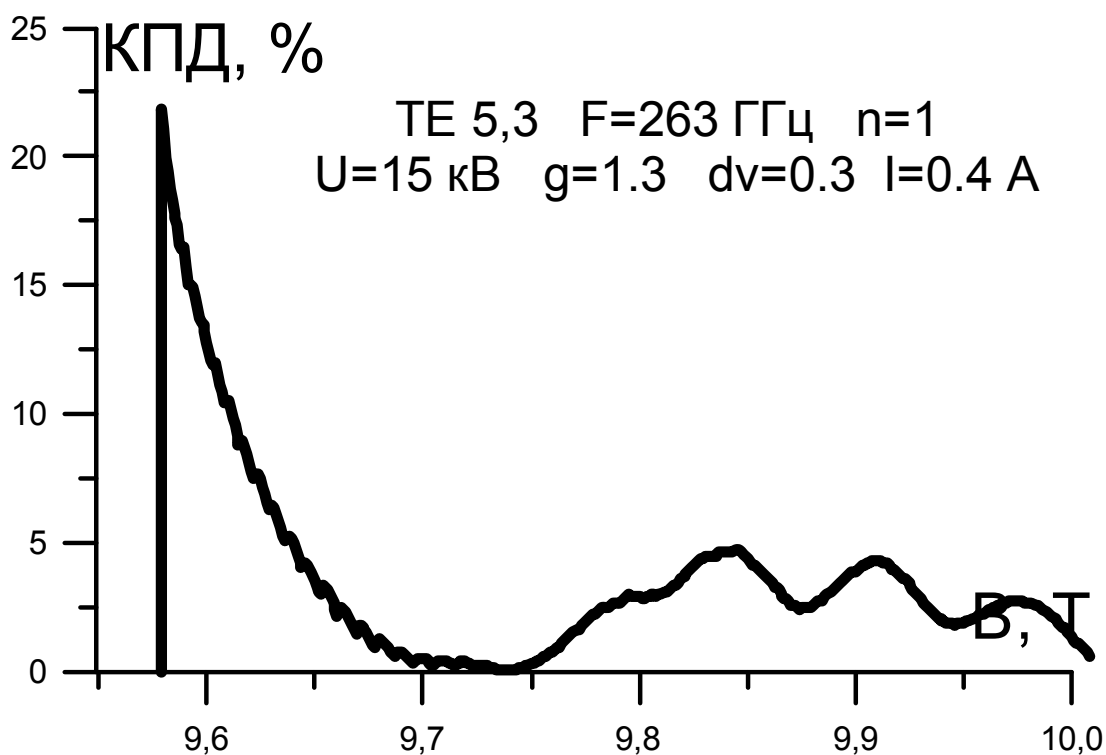


Рисунок 4.4 Зависимость выходного КПД от магнитного поля для ускоряющего напряжения 15 кВ, тока пучка 0,4 А, питч-фактора 1,3

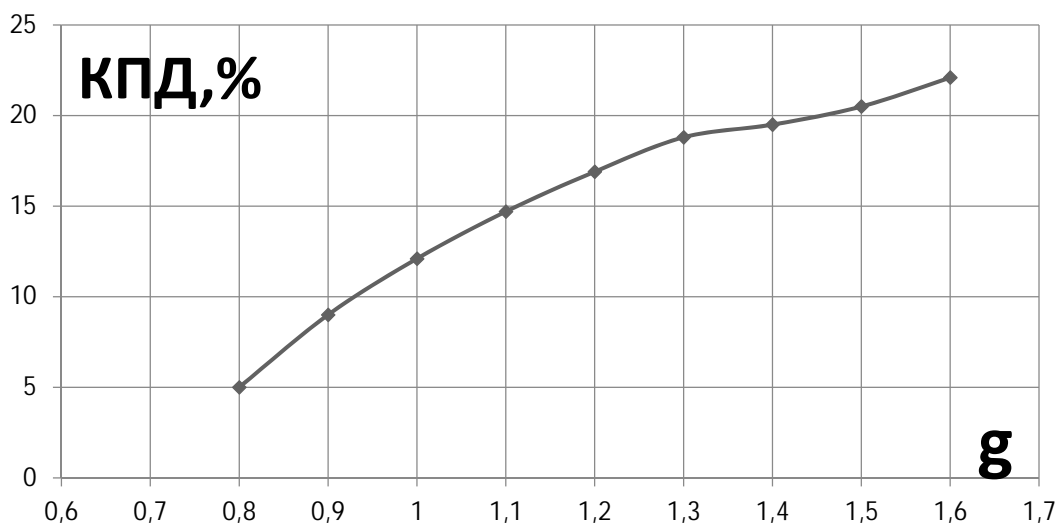


Рисунок 4.5 Зависимость КПД гиротрона от питч-фактора при ускоряющем напряжении 15 кВ, токе пучка 0.1 А и длины цилиндрической части 20 мм.

Для рассматриваемого нами гиротрона с рабочей модой $TE_{5,3}$ несоосность пучка с величиной отклонения $d=0.3$ мм приведет к уменьшению эффективного фактора связи на 40% по сравнению с несмещённым пучком. Для оценки изменения значения КПД можно воспользоваться результатами расчетов эффективности преобразования вращательной энергии электронов в энергию высокочастотного поля (так называемый поперечный КПД) от безразмерных параметров тока и длины резонатора¹⁴⁰. Для рассматриваемых нами параметров гиротрона уменьшение параметра тока, (в который фактор связи входит линейно) на 40%, приведет к уменьшению поперечного (и, следовательно, полного) КПД приблизительно на 20%.

Полученные оценки соответствуют результатам численного моделирования, выполненных на основе усредненных уравнений и с использованием PIC-кода KARAT (рисунок 4.7). Отметим, что для учета несоосности пучка и резонатора в укороченные уравнения, описывающие электронно-волновое взаимодействие в гиротроне вводится дополнительное усреднение по азимутальному углу ψ , а в уравнения движения - коэффициент перед амплитудой поля, характеризующий отличие поля для данной фракции от поля для невозмущенного пучка.

Из рисунка 4.7 видно, что относительное снижение КПД при смещении пучка $d=0.3$ мм (примерно $\lambda/3$) составляет величину 25%. Некоторое различие в значениях резонансного магнитного поля, при котором достигается максимум КПД, в модели на основе усредненных уравнений (9.575 Т) и в методе крупных частиц (9.45 Т), объясняется дискретностью сетки последнего. Как результат, реальный радиус резонатора при моделировании методом крупных частиц отличается от изначально задаваемого на величину в пределах половины шага сетки по поперечной координате. В данном случае это различие составляет примерно 1%.

¹⁴⁰ Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. КПД МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением ВЧ поля // Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ, 1972, №8, С.55-60.

Следует отметить, что проведенный численный анализ выполнен в предположении симметричного углового распределения питч-фактора и тока пучка относительно оси пучка. Вместе с тем, детальное моделирование электронно-оптической системы гиротрона, описанного в третьей главе показывает, что смещение оси пучка приводит к значительному нарушению симметрии питч-фактора, отклонения которого от среднего значения могут достигать 15 %¹⁴¹. Данный факт объясняется асимметрией магнитного поля на эмиттере, которая затем усиливается адиабатической накачкой. Влияние такого пучка на параметры генерации в гиротроне будет являться предметом последующих исследований.

Также одной из важных составляющих данного комплекса стала разработанная специально для него автоматизированная система управления (далее АСУ ГК). Ее необходимость и актуальность во многом была обусловлена тем фактом, что данные гиротронные комплексы зачастую эксплуатируются широким классом исследователей не обязательно имеющих специальную подготовку и навыки (например, специалистами по химии или биологии).

¹⁴¹ Семенов Е.С., Планкин О.П., Розенталь Р.М. Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика (направлено)

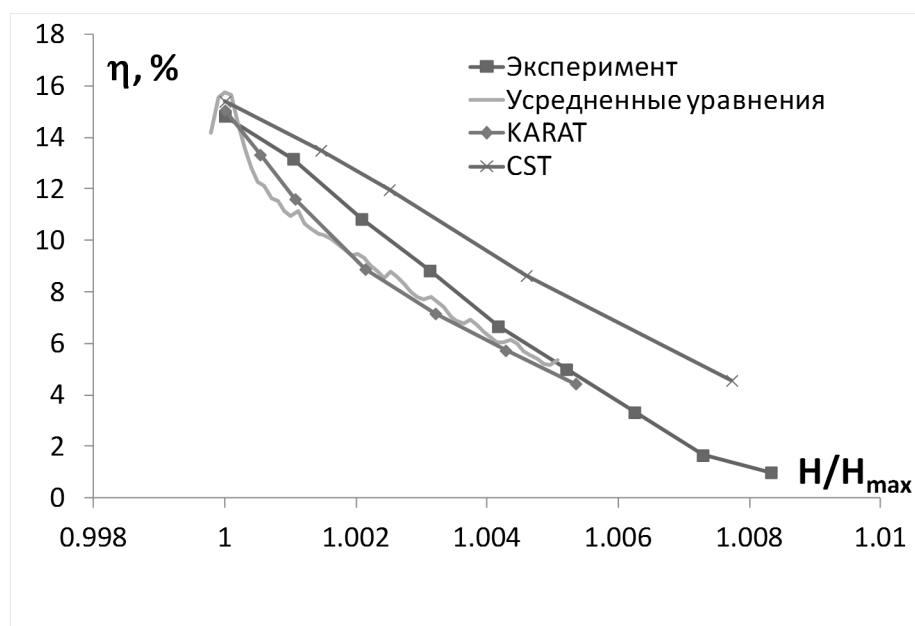


Рисунок 4.6. Зависимость полного КПД гиротрона от магнитного поля (нормированного на значение в максимуме КПД).

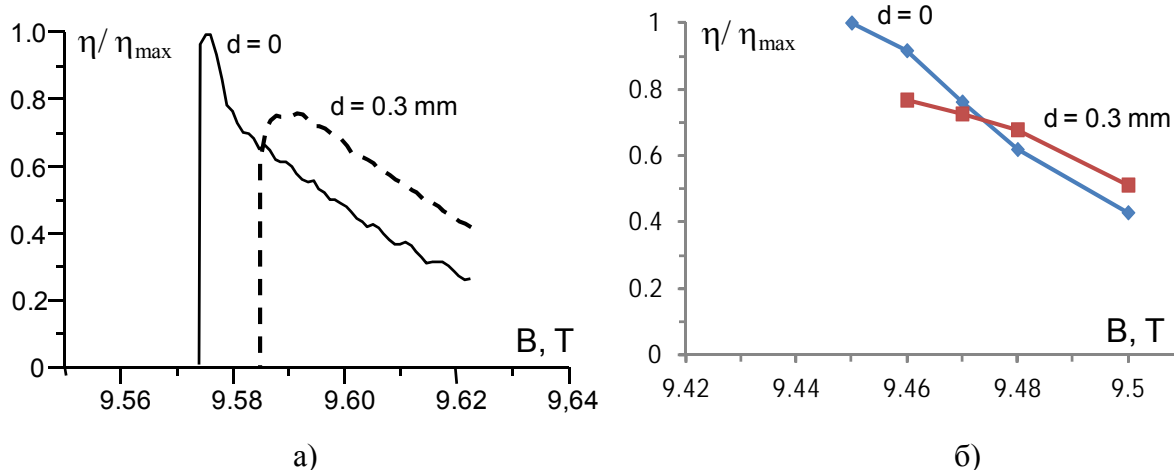


Рисунок 4.7. Зоны генерации гиротрона с несмещенным и смещенным пучком: а) – усредненные уравнения, б) – метод крупных частиц (код KARAT). КПД нормирован на максимальное значение для несмещенного пучка.

4.2 Экспериментальное исследование гиротрона и анализ полученных данных.

Выходная мощность измерялась с использованием калориметра, установленного непосредственно за выходным окном. Блок-схема измерений представлена на рисунке 4.10. В контуре водяного охлаждения калориметра были установлены два термодатчика, измеряющих температуру воды на входе $t_{\text{вх}}^{\circ}$ и выходе $t_{\text{вых}}^{\circ}$ из калориметра, а также нагреватель, предназначенный для проведения автоматической процедуры калибровки. Далее по разности температур ($t_{\text{вых}}^{\circ} - t_{\text{вх}}^{\circ}$) вычислялось значение мощности излучения P .

Был проведен ряд измерений выходной мощности в зависимости от вариаций технических параметров системы. Температура воды, охлаждающей резонатор поддерживалась постоянной на уровне 25°C с помощью специального охлаждающего устройства (так называемого чиллера) с точностью $0,5^{\circ}\text{C}$. Источник питания криомагнита (Oxford Instruments Mercury iPS-M) обеспечивает возможность перестройки величины магнитного поля с шагом около 10^{-3} Т. На рисунке 4.11 представлены зависимости мощности генерации P от напряженности магнитного поля B в резонаторе, силы тока в катодной катушке подмагничивания $I_{\text{кк}}$, тока электронного пучка I и ускоряющего (катодного) напряжения U в окрестности рабочей моды $\text{TE}_{5,3}$.

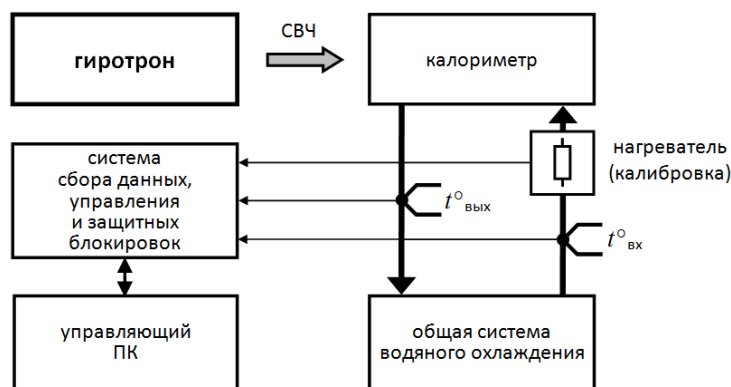


Рисунок 4.10. Блок-схема калориметрических измерений.

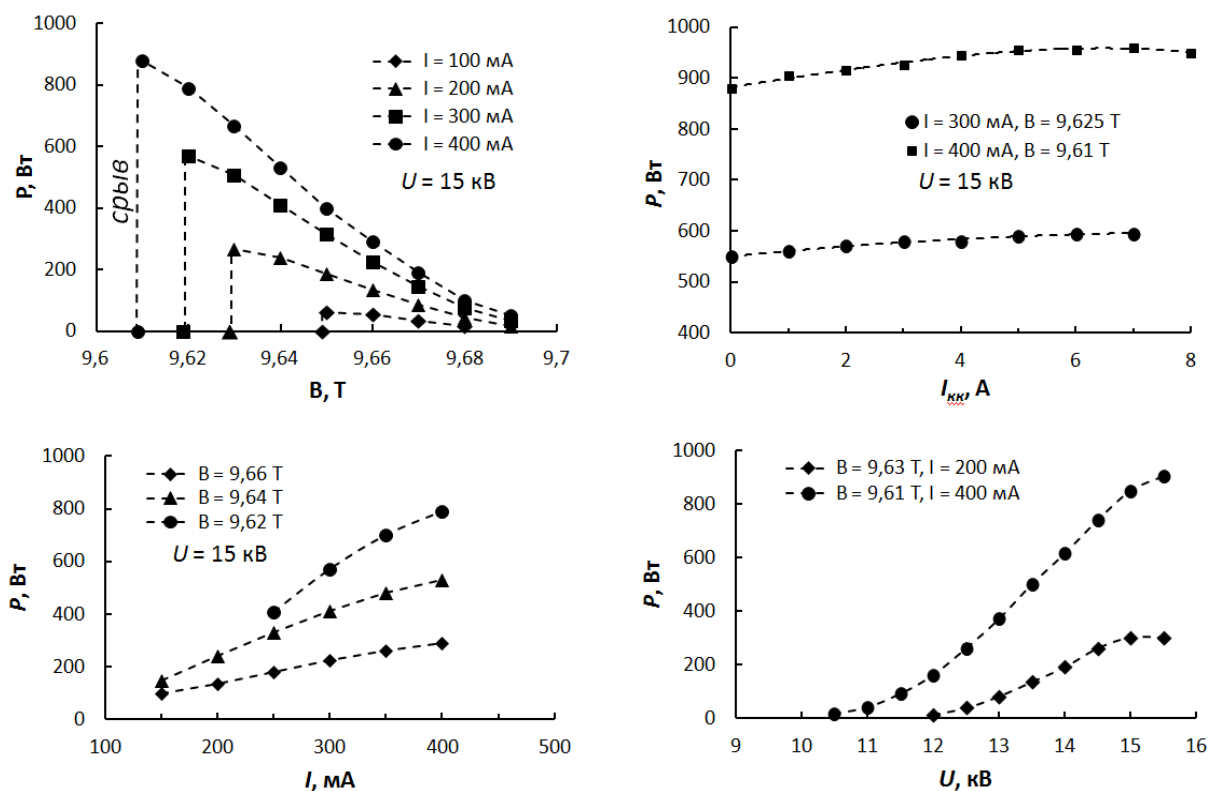


Рисунок 4.11. Зависимость мощности генерации P от различных параметров системы.

Выходная мощность достигала значения более 0.9 кВт при токе электронного пучка $I = 0.4$ А, катодном напряжении 15 кВ, напряженности магнитного поля около 9.605 Т. При этом максимальный КПД составил около 17%, что согласуется с результатами расчетов, проведенных на этапе разработки и проектирования гиротрона. Выходная мощность уменьшается примерно в 2 раза при увеличении магнитного поля на 0.04 Тл. Мощность генерации на уровне 1 кВт избыточна для большинства спектроскопических приложений, в которых требуемая мощность составляет величину в десятки Вт. В этой связи перспективным представляется экспериментально реализованный режим генерации при ускоряющем напряжении 14 кВ и малом токе – 0.02 А, в котором было получено достаточное для указанных приложений значение мощности около 10 Вт с КПД 3%. Следует отметить, что возможность работы в таком режиме существенно снижает требования (и стоимость) к основному источнику питания. В то же время режим с полной мощностью киловаттного уровня может быть перспективен для некоторых технологических приложений.

Полученные данные показывают, что выбор режима работы системы по выходной мощности может быть сделан с помощью целого ряда параметров. Это обеспечивает высокую гибкость системы с точки зрения использования ее для различных приложений.

Использование дополнительной катодной катушки подмагничивания, установленной в катодной области, позволяет в небольших пределах подстраивать выходные параметры излучения, что может быть актуально как один из возможных механизмов реализации системы автоматической стабилизации мощности.

Описываемый гиротрон имеет систему водяного охлаждения резонатора, температура которого поддерживается чиллером с точностью $0,5^\circ\text{C}$. При измерениях частоты небольшая часть излучения через ответвитель подается на смеситель, где смешивается с гармоникой высокостабильного сигнала внешнего гетеродина, имеющего частоту f_{LO} . Сигнал, поступающий из смесителя на промежуточной частоте f_{IF} , подавался на анализатор спектра производства фирмы Rohde&Schwarz. Затем частота генерации f определяется как сумма $nf_{\text{LO}} + f_{\text{IF}}$, где n - номер гармоники. На рисунке 4.13 (а) представлены экспериментальные зависимости частоты генерации f от тока электронного пучка I при различных значениях ускоряющего напряжения U и температуры резонатора T при фиксированном магнитном поле $B = 9.67 \text{ Т}$.

Таким образом, величина перестройки частоты при изменении температуры составила около $4 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$ (что соответствует предыдущим экспериментальным данным описанным в п. 3.2.5), а при изменении катодного напряжения – около $33 \text{ МГц}/\text{кВ}$. Ширина спектра Δf составляет около 0.5 МГц ($\Delta f / f \sim 10^{-6}$). На рисунке 4.12 (б) представлен снимок экрана анализатора спектра при проведении указанных измерений.

При интенсивности магнитного поля около 9.3 Т была получена генерация с мощностью около 10 Вт на частоте 0.502 ТГц , что соответствует генерации моды $\text{TE}_{10,5}$ на второй гармонике гирочастоты.

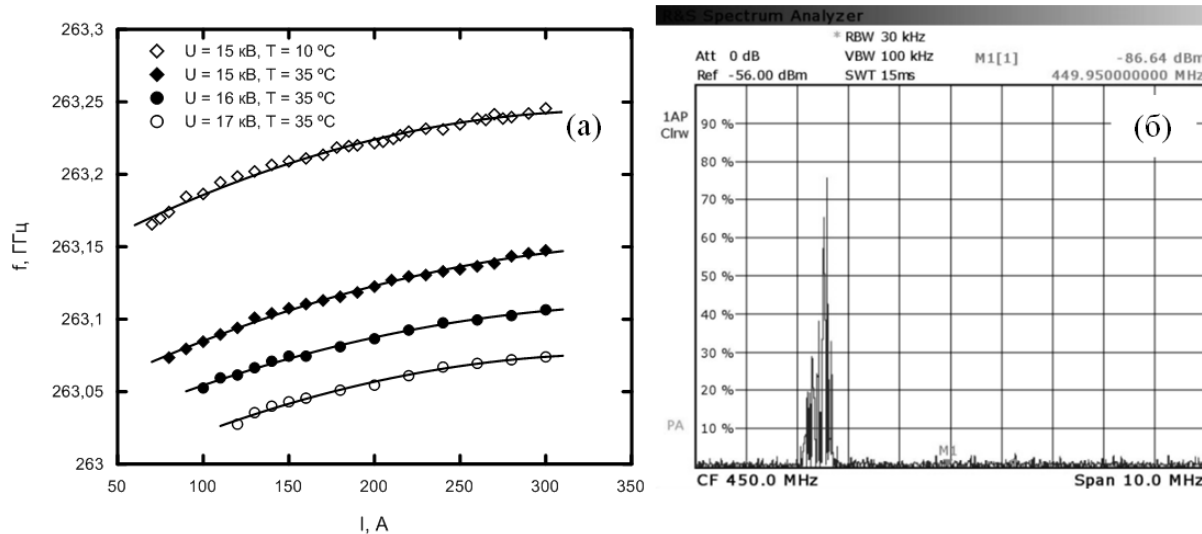


Рисунок 4.12. Зависимость частоты генерации f от тока электронного пучка I при различных значениях ускоряющего напряжения U и температуры резонатора T ($B = 9.67$ Т) (левый рисунок) и изображение спектра сигнала на экране анализатора (справа).

Одной из задач данной серии экспериментов, также, как и экспериментов, изложенных в главе 3, было уточнение эмпирического коэффициента, входящего в формулу для вычисления омических потерь в данном частотном диапазоне. С этой целью было произведено измерения мощности потерь в резонаторе. Данное измерение было выполнено аналогично схеме, представленной на рисунок 4.10, однако контур охлаждения калориметра был переключен на резонатор. На рисунке 4.14 показана зависимость выходной мощности излучения от мощности тепловых потерь в стенках резонатора.

Измеренная мощность тепловых потерь составила около 30% от мощности выходного излучения. Расчетное значение омической добротности Q_{ohm} , полученное с введением в формулу для омической добротности эмпирического коэффициента $1/2$ составило около 8800, а значение, полученное в результате измерений - около 12000. Таким образом эмпирический коэффициент учитывающий отличие добротности резонатора из реальной меди составил 1.5. Напомним, что в экспериментах, описанных в предыдущей главе данный коэффициент составил 1.5. Стоит отметить, что в данных гиротронах использовалась различная технология изготовления резонаторов, что может

говорить об универсальности данного коэффициента для данной области параметров

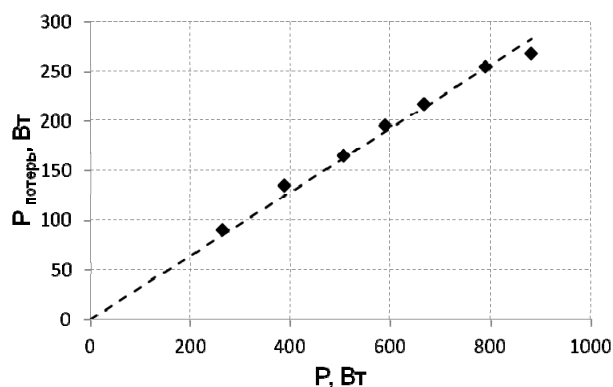


Рисунок 4.14. Зависимость мощности тепловых потерь в стенках резонатора от мощности излучения

Измерение распределения мощности СВЧ излучения гиротрона проводилось в нескольких сечениях при распространении волнового пучка гиротрона в свободном пространстве по тепловизионной методике¹⁴². Схема измерений приведена на рисунке 4.15.

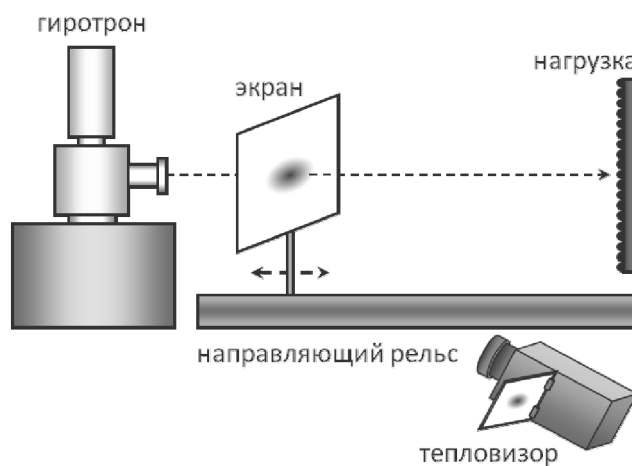


Рисунок 4.15. Схема измерений распределения мощности выходного СВЧ излучения гиротрона с помощью инфракрасной камеры.

Для измерений использовалась инфракрасная камера “VarioScan 3021 ST”, имеющая высокое разрешение по температуре 0.03 °С, что позволяет иметь

¹⁴² Kuznetsov S.O. and Malygin V.I. Determination of gyrotron wavebeam parameters // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1991. V. 12, № 11. P.1241-1252.

динамический диапазон измеряемых данных не менее 30 дБ. Распределение температуры на диэлектрическом экране соответствует проходящему сквозь экран распределению мощности выходного СВЧ излучения гиротрона. Измерения проводились в нескольких сечениях, что позволяет восстановить распределение фазы¹⁴³¹⁴⁴. Измеренные распределения амплитуды поля в поперечных сечениях волнового пучка гиротрона представлены на рисунке 4.16. На этом же рисунке приводятся реконструированные распределения фазы в этих сечениях, обеспечивающие взаимную трансформацию измеренных амплитудных распределений с эффективностью более 98%. Как показывает анализ, содержание волны TE_{M00} в волновом пучке составляет 93%. Восстановив фазовое распределение в поперечных сечениях и зная амплитудные распределения волнового пучка, можно получить информацию о всей трехмерной структуре поля, т.к. теперь поле в любой точке пространства может быть рассчитано с помощью метода Кирхгофа¹⁴⁵.

¹⁴³ *Chirkov A.V., Denisov G.G., Aleksandrov N.L.* 3D wavebeam field reconstruction from intensity measurements in a few cross sections // *Optics Communications*. 1995 V. 115 , P. 449-452.

¹⁴⁴ *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* // Теория волн. - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 384 с.

¹⁴⁵ Там же

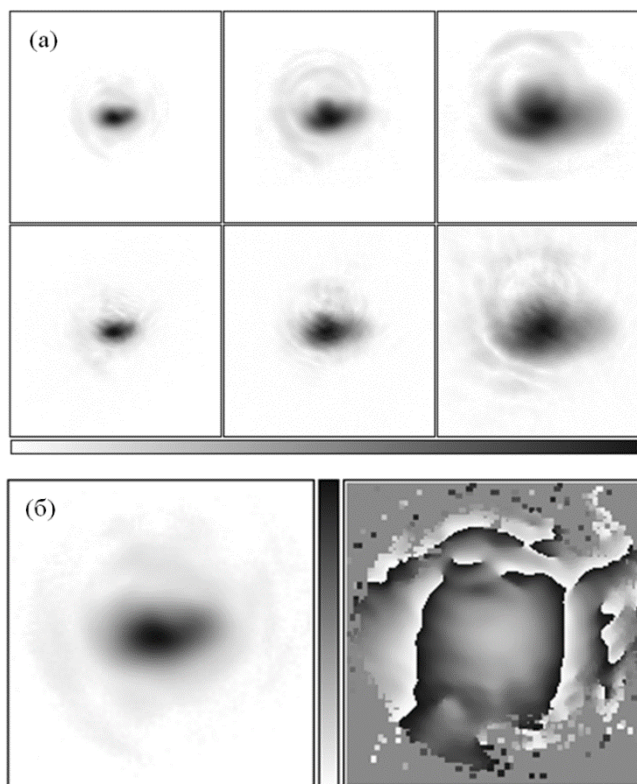


Рисунок 4.16. Измеренные распределения амплитуды поля в поперечных сечениях волнового пучка на различных дистанциях от окна гиротрона (237 мм, 387 мм и 687 мм) (рисунок (а) верхний ряд), реконструированные распределения амплитуды (рисунок (а) средний ряд) и фазы (рисунок (а) нижний ряд) в этих сечениях. Апертура – 200 мм × 200 мм. Распределения амплитуды и реконструированной фазы СВЧ излучения на расстоянии $Z = 237$ мм от выходного окна гиротрона (б) Содержание моды TEM_{00} 93%.

Заключение.

В данной главе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и оптимизацией микроволнового комплекса на основе гиротрона с рабочей частотой 0.263 ТГц, работающего на первой гармонике гирочастоты. В процессе оптимизации выбраны параметры электродинамической системы для которых с одной стороны можно реализовать киловаттный уровень мощности при работе с токами порядка 0.4-0.7 А, а с другой стороны, реализовать режимы работы при низких токах порядка 10-20 мА. С использованием как самосогласованной модели усреднённых уравнений, так и полного трехмерного моделирования системы рассмотрены эффекты несоосности электронного пучка в резонаторе

В результате был создан работающий в непрерывном режиме гиротронный комплекс с максимальным уровнем мощности около 1 кВт. Достигнута устойчивая одномодовая генерация на первой гармонике гирочастоты при малых рабочих токах пучка (10 мА), при сохранении высокого КПД прибора, что существенно упрощает требования к мощности и габаритам источников питания при работе в данных режимах. Показана возможность подстройки частоты при изменении температуры резонатора или рабочего напряжения, что является необходимым для ряда задач. Были измерены тепловые потери в резонаторе, что позволило оценить реальную омическую добротность и сравнить ее с результатами предыдущих экспериментов .

В настоящее время данный комплекс используется для различных научных и технологических приложений и должен стать основой для испытания следующих гиротронов терагерцового диапазона в том числе и работающих на гармониках гирочастоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Основные результаты диссертации

1. Впервые в России созданы гиротроны субтерагерцового диапазона частот средней мощности для многочисленных научно-технических приложений, в том числе для задач на основе динамической поляризации ядер с использованием ядерного магнитного резонанса. Продемонстрирована необходимая для спектроскопических исследований стабильность выходной частоты $5 \cdot 10^{-6}$ в течение нескольких часов непрерывной работы.

2. Предложен механизм комбинированной перестройки частоты генерации согласованным изменением магнитного поля в рабочем пространстве и температуры резонатора, с использованием режимов с несколькими продольными вариациями высокочастотного поля в резонаторе.

3. Показана эффективность электродинамической системы с выводом излучения в сторону катода, обеспечивающей увеличение полосы плавной перестройки рабочей частоты гиротрона.

4. Продемонстрированы возможности продвижения гиротронов на гармониках гирочастоты в терагерцовый диапазон при использовании электродинамических систем с повышенной селективностью, таких как связанные резонаторы с трансформацией мод и резонаторы с профилированной гофрировкой поверхности

5. На основе анализа влияния различных параметров (магнитное поле, параметры электронного потока, отражения, температура резонатора) на стабильность выходных характеристик терагерцовых гиротронов определены требования к оборудованию для спектроскопических гиротронных комплексов

6. Исследовано влияние реальных факторов (несоосность электронного пучка и резонатора, разброс скоростей электронов, омическая добротность) на режимы генерации гиротронов. Результаты исследования включены в методику проектирования терагерцовых гиротронов

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, могут быть использованы при дальнейшем теоретическом и экспериментальном исследовании субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов, проводимых в различных научных учреждениях и научно-производственных предприятиях.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

n - номер циклотронной гармоники (гирогармоники)

$\beta, \beta_{\perp}, \beta_{\parallel}$ - полная, осцилляторная и продольная скорости в рабочем пространстве, отнесенные к скорости света;

γ_0 - относительная энергия электронов (релятивистский масс-фактор);

ω - частота (циклическая) колебаний в резонаторе;

θ - угол пролета электронов;

λ - длина волны;

η - коэффициент полезного действия (КПД);

η_{el} - электронный КПД;

η_{\perp} - поперечный КПД

ω_H - гирочастота электронов (циклическая);

δv_{\perp} - скоростной разброс по поперечным скоростям электронов;

B_0 - индукция магнитного поля в резонаторе;

$f(v_{\perp})$ - функция распределения по поперечным скоростям;

g - питч-фактор;

G_{mp} - структурный фактор;

I - ток пучка;

$J_m(v)$ - функция Бесселя;

$J_m'(v)$ - производная функции Бесселя $J_m(v)$;

ν_{mp} - p -ый нуль функции Бесселя порядка m

P_{out} - выходная мощность;

Q - добротность резонатора;

Q_{ohm} - омическая добротность;

Q_{dif} - дифракционная добротность

R_0 - радиус ведущих центров электронного пучка в резонаторе;

R_c - радиус катода;

R_p - радиус резонатора;

t_{\perp} - отношение осцилляторной энергии к полной;

TE_{mp} – волноводная мода круглого волновода с азимутальным (m) и радиальным (p) индексами;

TE_{mpq} – мода цилиндрического резонатора круглого сечения с азимутальным (m), радиальным (p) и продольным (q) индексами (в случае $q=1$ третий индекс, как правило, опускается);

U_a – анодное напряжение;

U_o – ускоряющее напряжение;

СW-режим непрерывной генерации;

ВЧ– высокочастотный;

ВЭП – винтовой электронный пучок;

ДПЯ (англ DNP) –динамическая поляризация ядер

КОП –квазиоптический преобразователь

КПД - коэффициент полезного действия;

МИП – магнетронно-инжекторная пушка;

МЦР – мазер на циклотронном резонансе

СВЧ генерация – генерация на сверхвысоких частотах

УТС – управляемый термоядерный синтез

ЭПР – электронный парамагнитный резонанс

ЯМР (англ. NMR) - ядерный магнитный резонанс

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Оптимизация резонатора непрерывного 258 ГГц гиротрона на второй гармонике гирочастоты // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2009, Т.52, №5-6. С.418-424.

A2. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Численное моделирование непрерывных субмиллиметровых гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №5-6. С.408-417.

A3. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Особенности разработки высокостабильного непрерывного гиротрона с рабочей частотой 258 ГГц на второй гармонике // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №12. С.972-978.

A4. *Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Седов А.С., Цалолыхин В.И.* Система формирования электронного пучка для гиротрона с частотой 258 ГГц, предназначенного для экспериментов по динамической поляризации ядер // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, Т. 53, №4. С. 251-259.

A5. *Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолыхин В.И.* Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер. //Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, Т.53, №4. С.260-268.

A6. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Влияние не-соосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2011, Т.54, №6. С. 444-450.

A7. *Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Седов А.С., Пу Р., Нусинович Г.С., Гранаштейн В.Л.* Разработка мощного импульсного субтерагерцового гиротрона для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения // Изв.ВУЗов. Радиофизика, 2011, Т.54, №8-9. С.666-675.

- A8. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН // Изв. ВУЗов ПНД, 2012, Т. 20, №3. С.70-80.
- A9. *Glyavin M.Yu., Zavolskiy N.A., Sedov A.S., Nusinovich G.S.* Low-Voltage Gyrotrons // Physics of Plasmas, 2013 V.20. 033103:1-7.
- A10. *Глявин М. Ю., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Куфтин А. Н., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Седов А.С., Чирков А.В.* Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы // Радиотехника и электроника, 2014, Т. 59, № 8. С. 745–751.
- A11. *M.Yu. Glyavin, A.V.Chirkov, G.G.Denisov, A.P.Fokin, V.V.Kholoptsev, A.N.Kuftin, A.G.Luchinin, G.Yu.Golubyatnikov, V.I.Malygin, M.V.Morozkin, V.N.Manuilov, M.D.Proyavin, A.S.Sedov, E.V.Sokolov, E.M.Tai, A.I.Tsvetkov, V.E.Zapevalov* Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // Rev. Sci. Instr., 2015 V.86, №5. 054705.
- A12. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Заславский В.Ю., Лещева К.А., Розенталь Р.М., Седов А.С.* Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцового диапазона // Изв. ВУЗов ПНД 2015 т. 23, № 2. С. 108-118.
- A13. *Цветков А.И., Морозкин М.В., Глявин М.Ю., Малыгин В.И., Лубяко Л.В., Голубятников Г.Ю., Куфтин А.Н., Запевалов В.Е., Седов А.С., Чирков А.В., Фокин А.П., Холопцев В.В., Еремеев А.Г., Соколов Е.В., Денисов Г.Г.* Автоматизированный микроволновый комплекс на основе работающего в непрерывном режиме гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц и выходной мощностью 1 кВт // Изв. ВУЗов Радиофизика Т.58, №9. С.709-719.
- A14. *М.Ю. Глявин, Г.Г.Денисов, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, А.С. Седов, В.В. Холопцев, А.В. Чирков* Особенности оптимизации подсистем непрерывного гиротрона с частотой генерации 0,26 ТГц на основном циклотронном резонансе // Изв. ВУЗов Радиофизика Т.58 №9. С.720-731.
- A15. *Zapevalov V.E., Fix A.Sh., Kopelovich E.A., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S.* Development of 260 GHz Second Harmonic

CW Gyrotron with high stability of output parameters //Proceedings of 7 Int. Workshop Strong microwaves: Sources and applications. N. Novgorod, 2008. P.203.

A16. *Zapevalov V.E., Kuftin A.N., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Pavelyev A.B., Sedov A.S., Zavolsky N.A.* Development of 395 GHz gyrotrons for NDP spectroscopy on the basis of experience of elaboration 260 GHz gyrotron.// Proceedings of 8 Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” N.Novgorod, 2011. P.143-144.

A17. *Sedov A.S., Glyavin M.Yu., Manuilov V.N., Zavolsky N.A., Zapevalov V.E.* Investigation of multi-beam scheme for increasing of achievable gyrotron operation frequency // Proceedings of 9th Int. Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications N. Novgorod – Perm – N.Novgorod, 2014. P.219.

A18. *K.A. Leshcheva, A. S. Sedov, V. Yu. Zaslavsky, M. Yu. Glyavin* 3D modeling of the influence of azimuthal inhomogeneities of electron beams and electrodynamic system on the gyrotron operation regimes // 9th International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications N. Novgorod – Perm – N.Novgorod, 2014. P.188-189.

A19. *A.Sedov, A. Chirkov, G. Denisov, A. Ereemeev, M. Glyavin, A. Kuftin, V. Kholoptsev, A. Luchinin, V. Manuilov, M. Morozkin, I. Plotnikov, E. Tai, E. Soluyanov, V. Zapevalov* Development of subterahertz gyrotron for DNP NMR spectroscopy at IAP RAS // 9th International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications N. Novgorod – Perm – N.Novgorod, 2014 P. 124.

A20. *Ginzburg N., Glyavin M., Goldenberg A., Luchinin A., Petelin M., Sedov A., Zapevalov V., Zavolsky N., Zotova I.* Sub-THz gyrotrons with improved electro-dynamics and electron-optical systems // Proceedings of the 4-th Int. Workshop on Far Infrared Technology (IW-FIRT 2012), Fukui, Japan, 2012.

A21. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Теоретические и экспериментальные исследования непрерывных субмиллиметровых гиротронов, проводимые в ИПФ РАН // Материалы 20 Межд. Конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2010. С. 293-294.

A22. *М.Ю.Глявин, А.С.Седов, Н.А.Завольский, В.Е.Запевалов, М.А.Моисеев, Г.С.Нусинович* Оптимизация параметров гиротрона для работы на низких напряжениях // Тезисы докладов 9 Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Н.Новгород, 2013. С.49.

A23. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Повышение эффективности работы субмиллиметровых гиротронов за счет использования различных электродинамических систем. Материалы 20 Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2010. С. 295-296.

A24. *Завольский Н.А., Петелин М.И., Седов А.С., Фильченков С.Е.* Селекция мод в субмиллиметровом гиротроне с гофрированной стенкой резонатора // Материалы 22 Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2012 С.224-225.

A25. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Влияние несоосности электронного пучка на параметры гиротрона // Материалы 22 Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2012 С.223-224.

A26. *Glyavin M.Yu., Kuftin A.N., Maligin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S., Zapevalov V.E, Zavolsky N.A.* Theoretical and experimental investigation of submillimeter CW gyrotrons // Proceedings of 7 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10) and Workshop on Terahertz Technology and Spectroscopy of Complex Media (TeraTech'10), Kharkov, 2010 доклад W-1.

A27. *Glyavin M., Luchinin A., Manuilov V., Moiseev M., Sedov A., Zapevalov V.* Development of powerful terahertz gyrotrons // Proceedings of 7 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10) and Workshop on Terahertz Technology and Spectroscopy of Complex Media (TeraTech'10), Kharkov, 2010. доклад INV-1.

A28. *Завольский Н.А., Седов А.С.* Численное моделирование непрерывных 250-315 ГГц гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты // Тезисы докладов 13 сессии молодых ученых, Нижегородская обл., 2008. С.75.

A29. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Численное моделирование непрерывного терагерцового гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты // Материалы XIV Межд. зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике 2009 Саратов. С.32.

A30. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Особенности оптимизации терагерцового гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты // Тезисы докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн 2009 Н. Новгород. С.50.

A31. *Богдашов А.А., Денисов Г.Г., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Копелович Е.А., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Седов А.С., Фикс А.Ш., Чирков А.В.* Проект гиротронного комплекса для ДПЯ-спектроскопии // Тезисы докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн Н. Новгород, 2009. С.25.

A32. *Zapevalov V.E., Dubrov V.V., Fix A.Sh., Kopelovich E.A., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S., Venediktov N.P., Zavolsky N.A.* Development of 260 GHz second harmonic CW gyrotron with high stability of output parameters for DNP spectroscopy // The Conf. Digest of 34-th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves 2009, Busan. W3D04.0389.

A33. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Седов А.С.* Численное моделирование и экспериментальное исследование непрерывного 260 ГГц гиротрона на второй гармонике гирочастоты // Тезисы 9-ой Харьковской конф. молодых ученых, Харьков. 2009 С.14.

A34. *Zapevalov V.E., Fix A.Sh., Kopelovich E.A., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S., Tsololikhin V.I., Zavolsky N.A.* Elaboration of 260 GHz Second Harmonic CW Gyrotron with High Stability of

Output Parameters for DNP Spectroscopy // 35th Int. Conference IRMMW-THz 2010, Rome, 2010 We-E1.4

A35. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Влияние несоосности электронного пучка на параметры гиротрона // Тезисы Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Н. Новгород, 2011. С.64

A36. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Широкополосная перестройка частоты в гиротроне в режиме гиро-ЛОВ // Тезисы докладов 15 научной конференции по радиофизике ННГУ, Н. Новгород, 2011. С.43

A37. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Широкополосная перестройка частоты в гиротроне в режиме гиро-ЛОВ // Тезисы 11 Конф. молодых ученых по радиофизике, электронике, фотонике и биофизике. Харьков 2011. Th-18.

A38. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН // Материалы 15 Межд. зимней школы-семинара по электронике СВЧ и радиофизике, Саратов, 2012. С.90.

A39. *Sedov A.S., Zapevalov V.E, Kuftin A.N., Moiseev M.A., Zavolsky N.A.* Development of 395 GHz Gyrotrons for DNP Spectroscopy on the Basis of Experience of Elaboration 260 GHz Gyrotron //Abstracts of Int. Conference TERA 2012, Moscow Session 14 -5

A40. *Завольский Н.А., Петелин М.И., Седов А.С., Фильченков С.Е.* Селекция мод в гиротроне субмиллиметрового диапазона с гофрированной стенкой резонатора // XIV Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики", Звенигород, 2012, с. 213-214

A41. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* // Теоретическое и экспериментальное исследование непрерывных субмиллиметровых гиротронов в ИПФ РАН. Труды 14 научной конф. по радиофизике ННГУ, Н. Новгород, 2010, С. 64

A42. *А.П.Фокин, М.Ю.Глявин, В.Н.Мануилов, М.В.Морозкин, А.С.Седов* Восстановление ВАХ катода гиротрона по данным численного моделирования электронно-оптической системы // *Материалы 32 Всероссийской научно-технической конф. "Информационные технологии в науке, проектировании и производстве"*. Н.Новгород, ННИМЦ "Диалог", 2011, С.27.

A43. *М.Ю. Глявин, Н. А. Завольский, В.Е. Запевалов, К.А. Лешева, В.Н. Мануилов, А.С. Седов* Numerical modeling of azimuthal inhomogeneity of electron beam on gyrotron operation regime // *Межд. Конф. "Вакуумные электронные источники – 2014"*. Санкт-Петербург, 2014. С.134.

A44. *A.Chirkov, M.Glyavin, G.Denisov, A.Kuftin, A.Luchinin, V.Manuilov, A.Sedov, E.Tai, V.Zapevalov* Development and experimental investigations of THz band gyrotrons // *Межд. Конф. "Вакуумные электронные источники – 2014"* Санкт-Петербург, 2014 С. 157.

A45. *М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, М.В.Морозкин, А.С. Седов, Е.А.Солуянова, Е.М. Тай, А.В. Чирков* Разработка субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ ЯМР спектроскопии в ИПФ РАН // *24-я Межд. Конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 2014* Севастополь, С.209-210.

A46. *М.Ю. Глявин Г.Г. Денисов, Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, М.В.Морозкин, А.С. Седов, Е.А.Солуянова, Е.М. Тай, А.В. Чирков* Разработка гиротронных комплексов для задач ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН // *Материалы всерос. конф. «Радиоэлектронные средства получения обработки и визуализации информации»*. Н. Новгород, 2014. С.23.

A47. *Седов А.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Лешева К.А., Розенталь Р.М.* Влияние азимутальной несимметрии электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона // *Материалы 16 Межд. зимней школы-семинара по радиофизике и электронике СВЧ*. Саратов, 2015 С 75.

A48. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Нусинович Г.С., Петелин М.И., Седов А.С.* Оптимизация параметров маломощных терагерцовых

гиротронов // Материалы 16 Межд. зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот Саратов, 2015. С.76.

A49. *M.Yu.Glyavin, V.N.Manuilov, V.Yu.Zaslavsky, A.M.Malkin, A.P.Fokin, M.D.Proyavin, R.M.Rozental, A.S.Sedov, A.S.Sergeev, A.I.Tsvetkov, I.V.Zotova, N.S.Ginzburg, T.Idehara* Numerical modeling of mode excitation and mode competition at THz range gyrotrons operation at cyclotron harmonics // FIR Center Report FIR-UF-128, 2015.

A50. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Заславский В.Ю., Лещева К.А., Розенталь Р.М., Седов А.С.* Проблемы, обусловленные несоосностью пучка и резонатора в терагерцовых гиротронах. // Труды XIX Научной конференции по радиофизике, Н. Новгород, 2015 С. 54.

A51. *A.Chirkov, G.Denisov, M.Glyavin, A.Kuftin, V.Kholoptsev, V.Manuilov, M.Morozkin, M.Proyavin, A.Sedov, E.Tai, A.Tsvetkov, E.Sokolov, V.Zapevalov, N.Zavolsky* CW subterahertz gyrotron systems for spectroscopy and diagnostics of various media // Abstracts of the "RJUS TeraTech-2015", Chernogolovka P. 118.

A52. *A.Tsvetkov, A.Chirkov, G.Denisov, M.Glyavin, A.Eremeev, A.Kuftin, V.Kholoptsev, V.Malygin, V.Manuilov, M.Morozkin, A.Fokin, A.Sedov, E.Tai, V.Zapevalov, M.Koshelev, M.Tretyakov* Development of high power subterahertz CW gyrotrons and its application for spectroscopy and diagnostics of various media // 27th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, 2015 Greifswald.

A53. *M.Glyavin, A.Chirkov, G.Denisov, G.Golybyatnikov, A.Fokin, A.Kuftin, V.Kholoptsev, A.Luchinin, V.Manuilov, V.Malygin, M.Morozkin, M.Proyavin, A.Sedov, E.Sokolov, E.Soluyanova, E.Tai, A.Tsvetkov, V.Zapevalov* Development of THz Range CW Gyrotrons at IAP RAS // Proceedings of the 40th Int. Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves 2015, Hong Kong 15599163.

A54. *М.Ю.Глявин, Н.А.Завольский, В.Е.Запезалов, В.Ю.Заславский, К.А.Лещева, Р.М.Розенталь, А.С.Седов* Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцового диапазона // Материалы 25-ой Межд. конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, 2015. С 787-788.

A55. Седов А.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Морозкин М.В., Цветков А.И. Разработка гиротронного комплекса на частоте 0.263 ТГц для задач спектроскопии и технологических приложений // 18-я Всероссийская молодежная научная школа-семинар «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» Ульяновск 2015 С.34.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Книги на русском языке

1. *Вайнштейн Л.А.* «Электромагнитные волны» // М. «Радио и связь», 1988 г. 440 с.
2. *Под ред. О.М. Белоцерковского.* Математическое моделирование. Проблемы и результаты. // Сборник научных трудов. М., Наука, 2003 г. 477с.
3. *Под ред. А. В. Гапонова-Грехова.* Гиротроны. Сборник научных трудов // Горький: ИПФ АН СССР, 1981 г. 256 с.
4. *А.А. Кураев, И.С. Ковалев, С.В. Колосов.* Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ», Минск: Наука и техника, 1975 г. 296 с.
5. *А. Найфе* Введение в методы возмущений. Москва «Мир» 1984 447 с.
6. *Цимринг Ш.Е.* Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород, Институт прикладной Физики РАН, 2012 г. 576 с.
7. *Под редакцией В.А. Флягина.* Гиротроны. Сборник научных трудов // Горький: ИПФ АН СССР, 1989 г. 217 с.

Книги на английском языке

8. *Nusinovich G.S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons // The Johns Hopkins University press Baltimore-London 2004 г. 330 с.
9. *Sh.E. Tsimring* «Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics» Published by John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2007 г. 576 с.

Электронные ресурсы

10. Сайт компании Bridge 12: <http://www.bridge12.com/> (дата обращения: 2.12.2015)
11. Описание спектроскопических комплексов на основе гиротронов на сайте компании Bruker: <http://www.bruker.com/products/mr/nmr/dnp-nmr/overview.html> и <http://www.bruker-biospin.com/dnp-dir.html> (дата обращения: 7.12.2015)
12. Сайт программного продукта CST Studio Suite https://www.cst.com/Products/CSTS2_ (дата обращения 01.12.2015)

Статьи на русском языке

13. *Антаков И.И., Ергаков В.С., Засыпкин Е.В., Соколов Е.В.* Стартовые условия МЦР-монотрона при наличии разброса скоростей электронов // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1977. Т.20. №4. С.605.
14. *Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В.* Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения // УФН, 2011, Т.181, С.867–874.
15. *Братман В.Л., Моисеев М.А., Петелин М.И., Эрм Р.Э.* К теории гиротронов с нефиксированной структурой высокочастотного поля // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1973. Т.16. №4. С.622-630.
16. *Братман В.Л., Петелин М.И.* К вопросу об оптимизации параметров мощных гармонотронов с нефиксированной структурой высокочастотного поля // Изв. ВУЗов. Радиофизика 1975. Т.18. №10. С.1538-1543.
17. *Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запезалов В.Е. и др.* Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т.53. №4. С.260.
18. *Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М. и др.* Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1969. Т.12. №6. С.1236.
19. *Власов С. Н. , Колосова Е. В., Павельев А. Б., Пылин А. В., Хижняк В. И.* Гиротрон с эпелеттным резонатором на 2-й гармонике гирочастоты // Письма в ЖТФ. - 1981. Т. 17, № 4, С. 10-12.
20. *Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К.* Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1967, Т.10, №9–10, С.1414-1453.
21. *Голант М.Б., Алексеенко З.Т., Короткова З.С. и др.* Широкодиапазонные генераторы субмиллиметрового диапазона волн // ПТЭ 1969.Т.12 №3 С. 231

22. *Голубятников Г.Ю., Крупнов А.Ф., Лубяко Л.В. и др.* Прецизионное управление частотой гиротрона с помощью фазовой автоподстройки частоты // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 15. С. 13.
23. *Гольденберг А.Л., Петелин М.И.* Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1973. Т.16. №1. С.141.
24. *Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А.* Гиротроны диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн // Радиотехника и электроника, 1974, Т.19, №5, С.1056-1060.
25. *В.Е. Запевалов, В.К. Лыгин, О.В. Малыгин, М.А. Моисеев, В.И. Хижняк, В.П. Карнов, Е.М. Тай, Т. Идехара, С. Мицудо. И. Огава, Т. Сайто.* Мощный генератор непрерывного электромагнитного излучения частотой 300 ГГц. Изв. вузов. Радиофизика, 2007, т.50, №6, с.461-470.
26. *Запевалов В.Е., Малыгин О.В.* Дифракционная добротность слабokonических резонаторов гиротронов. Изв. вузов. Радиофизика, 1983, т. 26, №7, с. 903-905.
27. *Запевалов В.Е., Малыгин С.А., Павельев В.Г., Цимринг Ш.Е.* Гиротроны на связанных резонаторах с трансформацией мод // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1985, Т. 27, №4.
28. *Запевалов В.Е.* Эволюция гиротронов // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2011, 54, 8–9, 553– 572
29. *Лысенко Е.Е., Паньков С.В., Пишко О.Ф., Чумак В.Г., Чурилова С.А.* Разработка клинотронов непрерывного действия для диапазона 400...500 ГГц. // Электромагнитные волны и электромагнитные системы, 2010, 15,112, 63-71
30. *Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е.* Об учете сил пространственного заряда при траекторном анализе протяженных электронных пучков // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1981, Т.24, №4, С.491-497
31. *Моисеев М.А., Нусинович Г.С.* Некоторые результаты численных исследований уравнений гиротрона // Гиротрон. Сб. научных трудов. Горький: Институт прикладной физики АН СССР, 1981. — С. 41-52.

32. *Негирев А.А.* Широкополосные ЛОВ, непрерывно перекрывающие миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн // Вакуумная СВЧ электроника, Н.Новгород, 2002, с.93
33. *Нусинович Г.С., Эрм Р.Э.* КПД МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением ВЧ поля // Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ, 1972, №8, с.55-60.
34. *Нусинович Г.С.,* Конкуренция мод в гиromонотроне с нарушенной аксиальной симметрией // Радиотехника и электроника 1974, Т.19 №8 с.1788-1790
35. *Панкратова Т.Б., Нусинович Г.С.* // Экспериментальное исследование диагностического гиротрона // ЖТФ, 1989, Т.59, №8, С.110
36. *Семенов Е.С., Планкин О.П., Розенталь Р.М.* Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика 2015, Т. 23, №3, С.94
37. *Цимринг Ш.Е.* Формирование винтовых электронных пучков. // Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров). Кн. 4. Саратов: СГУ, 1974, С.3-94
38. *Цимринг Ш.Е.* О разбросе скоростей в винтовых электронных пучках // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1972, Т.15, №8, С.1247-1259.

Статьи на английском языке

39. *A. Abragam, M. Goldman.* Principles of dynamic nuclear polarisation 1978 *Rep. Prog. Phys.* 41 395.
40. *Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Goldenberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K.* The gyrotron: high-power source of millimeter and submillimeter waves // *Infrared Phys.*, 1978, V.18, №6, P.385-393.
41. *V.S. Bajaj, C.T. Farrar, M.K. Hornstein, I. Mastovsky, J. Viereg, J. Bryant, B. Elena, K.E. Kreischer, R.J. Temkin, and R.G. Griffin,* Dynamic nuclear polarization at 9 T using a novel 250 GHz gyrotron microwave source // *Journal of Magnetic Resonance.* 2003 V.160 P.85–90.

42. *Bratman V.L., Dumesh B.S., Fedotov A.E. et al.* Terahertz Orotrons and Oromultipliers // IEEE Trans. Plasma Sci., 2010, 38 1466IEEE Trans. Plasma Sci., 2010, №38, P.1466-1471
43. *Bratman V.L., Kalynov Yu.K. Manuilov V.N.* Large-Orbit Gyrotron Operation in the Terahertz Frequency Range // Phys. Rev. Lett. 2009, 102, 245101
44. *Yu.V.Bykov, N.S.Ginzburg, M.Yu.Glyavin, S.V.Golubev, G.G.Denisov, A.G.Luchinin, V.N.Manuilov* The development of gyrotrons and their applications for plasma science and material processing // International Journal of Terahertz Science and Technology, 2014 V.7, №2, P.70-79.
45. *Denisov G.G., Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E.* Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion // Nuclear Fusion, 2008, V.48, №1, 054007:1-5
46. *G.G. Denisov, D.A. Lukovnikov, W. Kasperek, D. Wagner* // Int. J. Infrared and MM Waves, 1996. V.17. №5. P.933
47. *Vasyl Denysenkov , Mark J. Prandolini , Marat Gafurov , Deniz Sezer , Burkhard Endeward and Thomas F. Prisner* // Phys. Chem. Chem. Phys., 2010, №12, P.5786
48. *O. Dumbrajs and G.S. Nusinovich,* Effect of technical noise on radiation linewidth in free-running gyrotron oscillators // Physics of plasmas, 1997, №4(5), P.1413-1423
49. *Dumbrajs O.* Eccentricity of the electron beam in a gyrotron cavity // Int. J of Infrared and MM Waves, 1994, V.15, №.7, P.1255-1262.
50. *Flyagin V.A., Luchinin A.G., Nusinovich G.S.* // Int. J. Infrared Millimeter Waves 1983 №4 P.629.
51. *Fu W., Yan Y., Yan X., Yuan X., Liu S.* Generating 0.42 THz radiation from a second harmonic gyrotron// Chinese Science Bulletin, 2011, V.56, №33, P.3572-3574
52. *Gavrilov N.G., Knyazev B.A., Kolobanov E.I. et al.* Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2007, V.1-2 №4 p.575
53. *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A.* Int. J. Electronics, 1986, V.61, №.6, pp.881-894.

54. *Glyavin M.Yu., Goldenberg A.L., Kuftin A.N., V.K.Lygin, A.S.Postnikova, Zapevalov V.E.* Experimental studies of gyrotron electron beam systems // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 27, 1999, 2, 474-483
55. *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu.*, Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100, 015101:1-4.
56. *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Nusinovich G.S.* et al. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // *Appl. Phys. Lett.*, 2012, №101, 153503:1-4.
57. *M.Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, and G.Yu. Golubiatnikov* Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // *PRL*, 2008 №100, 015101.
58. *M. K. Hornstein; V. S. Bajaj, R. G. Griffin; and R. J. Temkin.* Efficient low-voltage operation of a CW gyrotron oscillator at 233 GHz // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007 V.35, №1, p.27-30.
59. *Idehara T., Saito T., Ogawa I.* // *Thin Solid Films* 2008, V. 517. № 4. P.1503.
60. *Idehara, T.; Shibutani, K.; Nojima, H.; Pereyaslavets, M.; Yoshida, K.; Ogawa, I.; Tatsukawa, T.* Study of Electron Beam Misalignment in a Submillimeter Wave Gyrotron// *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves* 1998 V. 1 №19 P.1303-1316
61. *T. Idehara, K. Yoshida, N. Nishida, I. Ogawa, M. Pereyaslavets, T. Tatsukawa* CW operation of a submillimeter wave gyrotron (gyrotron FU IV) for high stability of the output frequency // *Int. J. Infrared and MM Waves*, 1998. V.19. №6. P.793.
62. *T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo, M. Pereyaslavets, N. Nishida, and K. Yoshida* Development of frequency tunable, medium power gyrotrons (gyrotron FU series) as submillimeter wave radiation sources // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1999 V.27, №2, P.340–354.
63. *Khutoryan E.M., Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Idehara T.* Theoretical Study of the Effect of Electron Beam Misalignment on Operation of the Gyrotron FU IV // *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2014, V.42, №.6, P.1586-1593.

64. *Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E.* Numerical Simulation Models of Focussing Systems of Intense Gyrotron Helical electron Beams // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves 2001, V.22, №8, P.1119.
65. *Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., Postnikova A.S., Zapevalov V.E.* // Int. J. Infrared and MM Waves, 1999. V.20. №3. P.361.
66. *Kuftin A.N., Lygin V.K., Tsimring Sh.E., Zapevalov V.E.* Numerical simulation and experimental study of magnetron-injection guns for powerful short-wave gyrotrons // Int. J. electronics, 1992, V. 72, P.1145-1151.
67. *Kuznetsov S.O. and Malygin V.I.* Determination of gyrotron wavebeam parameters // Int. J. of Infrared and MM Waves. 1991. V. 12, № 11. P.1241-1252.
68. *V.K. Lygin* Numerical simulation of intense helical electron beams with the calculation of the velocity distribution functions. Int. J. Of Infrared and MM waves. 1995, v.16, №.2, pp.363-376
69. *Moiseev M.A., Nemirovskaya L.L., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A.* // Int. J. Infrared and MM Waves, 1997. V.18. №11. P.2117.
70. *M.V.Morozkin, M.Yu.Glyavin, G.G.Denisov, A.G.Luchinin* A high-efficiency second harmonic gyrotron with a depressed collector // Int. J. IRMM Waves, 2008, V.29, №11, P. 1004.
71. *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M., Antonsen T.M., Cauffman S.* Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // Phys. Plasmas, 2001, V. 8, №.7, P.3473.
72. *Nusinovich G.S., Pu R., Antonsen T.M., Jr. et al.* // Development of THz-range gyrotrons for detection of concealed radioactive materials Int. J. IRMM&THz Waves, 2011, 32, 380-402.
73. *Nusinovich G.S., Pu R., Antonsen Jr.T.M. et al.* // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2011. V. 32. №3. P.380.
74. *S. Sabchevski, T. Saito, T. Idehara et all* Simulation of mode interaction in the Gyrotron FU CW I // Int. J. Infrared and MM Waves 2007, V.28, №5, P.1079
75. *T. Saito, T Nakano, H. Hoshizuki et all* Performance test of CW 300 GHz Gyrotron FU CW I // Int. J. Infrared and MM Waves, 2007, V.28. №5,P.1063.

76. *Samsonov S.V., Denisov G.G., Bratman V.L., Bogdashov A.A., Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Lygin V.K., Thumm M.K.* Frequency-tunable CW Gyro-BWO with a helically rippled operating waveguide // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2004 V.32, №3, P. 884-889
77. *Antonio C. Torrezan, Seong-Tae Han, Ivan Mastovsky, Michael A. Shapiro, Jagadishwar R. Sirigiri, Richard J. Temkin, Alexander B. Barnes, and Robert G. Griffin.* Continuous-Wave Operation of a Frequency-Tunable 460-GHz Second-Harmonic Gyrotron for Enhanced Nuclear Magnetic Resonance // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, June 2010, V 38, №. 6,
78. *Torrezan A.C., Shapiro M.A., Sirigiri J.R., Temkin R.J.* Operation of a Continuously Frequency-Tunable Second-Harmonic CW 330-GHz Gyrotron for Dynamic Nuclear Polarization. IEEE Trans. Elec. Dev., 2011, №58, 2727-2783
79. *Torrezan A. C., Shapiro M. A., Sirigiri J. R. et al.* IEEE Trans. 2011. V.ED-58. №8. P.2777

Материалы конференций

80. *Denysenkov V., Kiseliov V.K., Prandolini M.M., Gafurov M., Krahn A., Engelke F., Bezborodov V.I., Kuleshov Ye.M., Nesterov P.K., Yanovsky M.S., Prisner T.F.* 260 GHz Quasioptical Setup for EPR and DNP experiments on the 9.2 Tesla DNP/NMR/EPR spectrometer Proceedings of 7 Int. Symposium on Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov, Ukraine, 2010
81. *M.Glyavin, T.Idehara, S.Mitsudo, I.Ogawa* Investigations of fine frequency tuning potentialities of Gyrotrons FU Series FIR Center Report // FIR-FU-53, 2004
82. *S. Jawla, E. Nanni, et al.* Design of a 527 GHz gyrotron for DNP-NMR spectroscopy // Proc. 2011 Intl. Conf. IR, MM and THz Waves 2011.
83. *Humphreys K et al.* Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering // Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2004, V.2 P. 1302,

84. *T. Idehara, I. Ogawa, H. Mori, S. Kobayashi, S. Mitsudo, and T. Saito* A THz gyrotron FU CW III with a 20 T superconducting magnet. // Proc. 33rd Int. Conf. Infrared, Millim. Terahertz Waves, Pasadena, CA, Sep. 2008, P. 1–2.
85. *T. Kikunaga, N Sato, H. Shimawaki, T Suzuki, K. Yokoo, S Ono, G. Kido, Y. Terumichi* Design and the first experiment of a 1 THz gyrotron // Electron Devices Meeting, IEDM '93.
86. *E. V. Kuposova* Ohmic losses at plane wave diffraction on a metal corrugated surface // 26th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, July 22- 30, 2014, IAP RAS, Nizhny Novgorod
87. *Read M., Ives L., Neilson J, Nusinovich G.* Development of a High Power Pulse THz Gyrotron // Int. Vacuum Electronics Conf., Kitakyushu, Japan, 2007