

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

«Разработка гироприборов с дискретной и непрерывной перестройкой частоты для спектроскопии и диагностики плазмы»

Аспирант:

Зуев Андрей Сергеевич

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Запевалов Владимир Евгеньевич, доктор
физико-математических наук, зав. лаб. 151,
ИПФ РАН

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород
2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время в связи с потребностями целого ряда приложений усилился интерес к разработке субтерагерцовых и терагерцовых источников непрерывного излучения с различным уровнем мощности [1-5]. Для некоторых приложений ключевым фактором является возможность контроля частоты излучения (перестройки и стабилизации). Частотно-перестраиваемые источники излучения активно используются, например, в ЯМР-спектроскопии: достаточно интенсивное микроволновое излучение позволяет значительно уменьшить время, необходимое для накопления информации [6-9]. Кроме того, для многих спектроскопических приложений необходимы широкополосные источники. Это требуется, в частности, для задач диагностики плазмы, где широкополосная перестройка частоты излучения позволяет оперативно получить информацию о слоях плазмы разной плотности. По совокупности параметров одним из перспективных, или даже единственным типом источников с требуемыми характеристиками является гиротрон [9-14]. Необходимым условием генерации излучения в гиротроне является выполнение условия синхронизма между собственной частотой резонатора и одной из гармоник циклотронной частоты:

$$\omega = n\omega_H + k_{\parallel}v_{\parallel}, \quad (1)$$

где ω - частота выходного излучения, $n = 1, 2, 3 \dots$, - номер синхронной с волной гармоники гирочастоты, $\omega_H = eB_0/\gamma m_0$ - релятивистская гирочастота электрона, e и m_0 - заряд и масса покоя электрона, $\gamma = 1 + U_0[\text{кВ}]/511$ - лоренц-фактор, U_0 - ускоряющее напряжение, k_{\parallel} - продольное (в направлении постоянного магнитного поля) волновое число, v_{\parallel} - продольная скорость электронов. Как правило, гиротроны работают на квазикритической частоте с минимальным числом продольных вариаций ВЧ-поля ($k_{\parallel} \ll \omega/c$), что снижает влияние разброса поперечных скоростей электронного пучка на эффективность генерации излучения.

Непрерывная перестройка частоты в гиротроне может быть реализуема за счёт последовательного возбуждения собственных мод с одной поперечной структурой, но с различным числом продольных вариаций [15-18]. Изменение частоты выходного излучения осуществляется либо за счёт изменения величины магнитного поля B_0 , либо за счёт изменения ускоряющего напряжения U_0 (быстрая перестройка частоты), при этом электродинамическая система должна обеспечить выполнение условия синхронизма.

Ступенчатая перестройка частоты в гиротроне может быть выполнена за счёт последовательного возбуждения нескольких собственных мод резонатора путем изменения магнитного поля в широких пределах. Способ ступенчатой перестройки

частоты в гиротронах известен достаточно давно и в настоящее время опубликовано значительное число работ, посвященных его реализации [19-23]. Данный метод перестройки частоты в той или иной степени характерен для всех гиротронов: изменение рабочего магнитного поля в гиротроне всегда приводит к возбуждению собственных мод резонатора со своей частотой генерации. Проводя измерения последовательно во всём диапазоне магнитных полей, при этом дополнительно меняя и другие параметры гиротронной системы, например ускоряющее напряжение, зачастую наблюдают генерацию огромного числа рабочих мод на разных частотах. Одной из первых групп, занявшихся исследованием свойств частотно-перестраиваемых гиротронов, была группа из Сиднейского университета (Австралия) [19], где был изготовлен и успешно протестирован гиротрон с малой мощностью с перестройкой частоты в диапазоне 125-260 ГГц. Позже диапазон дискретной перестройки был расширен до 150-600 ГГц за счёт возбуждения мод, синхронных со второй гармоникой циклотронной частоты [20].

Способ ступенчатой перестройки частоты распространён и для мощных гиротронов. Так, в работах [22,23] рассмотрен гиротрон с мегаваттным уровнем мощности, работающий в частотном диапазоне 100-156 ГГц. Параметры гиротрона оптимизированы с целью достижения максимальной мощности выходного излучения с учётом тепловой нагрузки на стенки резонатора. Похожие работы проведены в институте Карлсруэ, Германия, где в коаксиальном гиротроне экспериментально реализована дискретная перестройка частоты в диапазоне 134-169,5 ГГц с мощностью более 1 МВт [23]. В работах [22,23] использовались криомагниты с магнитным полем до 7 Т. Появление и быстрое развитие «сухих» (не требующих заливки криогенными жидкостями) сверхпроводящих магнитных систем повышает интерес к разработке частотно-перестраиваемых субтерагерцовых и терагерцовых гиротронных комплексов. Криомагниты со сходными характеристиками в настоящее время производятся многими фирмами в США, Японии и Великобритании, поэтому задача оптимизации системы гиротрон - криомагнит носит достаточно общий характер. Такие магнитные системы, работающие в непрерывном режиме, создают магнитное поле до 16 Тл.

подавляющее большинство промышленно выпускаемых гиротронов имеют канонический вид, но всё больший интерес вызывают неканонические гиротроны [24]. Причиной этому с одной стороны является исчерпывание возможностей традиционных методов селекции, которых часто бывает недостаточно для реализации устойчивой генерации выбранной моды. С другой стороны, уникальные свойства некоторых неканонических гиротронов существенно расширяют возможности приборов гиротронного типа и открывают новые перспективы для вакуумной электроники.

Примером перспективного неканонического гиротрона с точки зрения его возможности по созданию частотно-перестраиваемого излучения являются гиротроны с эшелеттными резонаторами. Принципы построения эшелеттных резонаторов описаны в [25-28]. В таких резонаторах рабочие режимы формируются отражением волн от гофрированных поверхностей.

Другим примером неканонического гиротрона являются многолучевые гиротроны. Впервые они были предложены ещё в 80-е годы [29] и в настоящий момент прослеживается рост интереса к ним [30-32]. В многолучевых гиротронах к основному пучку добавляется один или несколько электронных пучков. В зависимости от параметров (главным образом - величин осцилляторной и дрейфовой скоростей) дополнительный электронный пучок может быть излучающим или выполнять функцию электронного поглотителя [24,33]. Многолучевая схема может быть использована для многочастотной генерации при взаимодействии разных пучков с разными модами. Многочастотная генерация может быть организована последовательно при изменении циклотронной частоты или одновременно (при фиксированном магнитном поле электроны в пучках могут иметь разную энергию и находиться в резонансе с разными модами на разной частоте). В [30] приводятся результаты успешных испытаний нового двухлучевого гиротрона ТГц-диапазона на второй гармонике гирочастоты. В нем наблюдалась генерация целого ряда мод на первой и второй гармониках, что делает такие многочастотные приборы привлекательными для многих приложений. В многолучевых системах дополнительные электронные пучки могут способствовать возбуждению большего числа рабочих мод и лучшему освоению рабочего диапазона частот.

Развить подход секционирования активной среды можно за счёт использования различных электродинамических методов селекции [34,35]. Многолучевые системы из пучков разных типов могут быть построены в сочетании с самыми разнообразными электродинамическими системами. Одними из перспективных приборов такого типа являются многоствольные гироприборы. При различных параметрах пучков и разной связи между резонаторами могут быть реализованы самые разнообразные динамические и стохастические режимы и, в частности, открывается огромное количество возможностей с точки зрения перестройки частоты. Некоторая техническая сложность таких систем может компенсироваться их уникальными характеристиками.

Цель работы состоит в рассмотрении перспективности, исследовании и разработки ряда гироприборов (канонических гиротронов, гиротронов с эшелеттными резонаторами, многолучевых и многоствольных гиротронных систем) с дискретной и

непрерывной перестройкой частоты. Для поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка перестраиваемых в широком диапазоне частот субтерагерцовых канонических гиротронов, работающих на частотах до 260 ГГц и до 250 ГГц с мощностью выходного излучения 200 Вт и 200 кВт соответственно с целью выявления специфики работы частотно-перестраиваемых гиротронов с разным уровнем мощности.
2. Разработка методики расчета гиротронов с эшелеттными резонаторами для изучения особенностей реализации непрерывной перестройки частоты в таких приборах.
3. Исследование специфики влияния омических потерь на процессы взаимодействия мод и эффективность работы гиротрона в зависимости от рабочей частоты. Рассмотрение возможности понижения доли омической добротности за счёт выбора материала резонатора гиротрона и его температурного режима.
4. Исследование возможностей частотно-перестраиваемых двухлучевых гиротронов с последовательной или одновременной многочастотной генерацией.
5. Разработка перспективных схем многоствольных многолучевых гиротронов для перестройки и повышения рабочей частоты.

Научная новизна работы. Все результаты, включенные в научно-квалификационную работу, являются новыми и получены впервые, в частности:

- Разработаны новые частотно-перестраиваемые субтерагерцовые гиротроны с разной мощностью выходного излучения. Предложен вариант частотно-перестраиваемого гиротрона для работы в предельно широком интервале частот (0,1-0,26 ТГц) с выходной мощностью до 260 кВт с учётом ограничений, налагаемых магнитной системой.
- Предложена оригинальная методика расчёта гиротронов с эшелеттными резонаторами. Ранее эшелеттные гиротроны рассматривались как перспективные устройства для задач по повышению мощности выходного излучения и частоты генерации. В данной работе обсуждается перспективность данных приборов с точки зрения создания частотно-перестраиваемых источников субтерагерцового диапазона.
- Для повышения эффективности и селекции мод предложены новые способы понижения доли омических потерь в субтерагерцовых гиротронах: изменение материала резонатора и охлаждение резонатора до криогенных температур.

- Предложена новая схема многолучевого многоствольного гиротрона. Рассмотрены несколько перспективных вариантов реализации нового гироприбора для задач по перестройке и повышения рабочей частоты. Показана возможность реализации рекордной непрерывной перестройки частоты в диапазоне 133,2-146,3 ГГц по уровню мощности выходного излучения 35 Вт.

Научная значимость. В работе подробно описан процесс разработки частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов с разной выходной мощностью. Указаны основные принципы реализации ступенчатой перестройки частоты в гиротронах. Особое внимание уделено комплексной оптимизации электронно-оптической и электродинамической систем. Научная значимость заключается в том, что полученные результаты упрощают создание частотно-перестраиваемых гиротронов с уникальными характеристиками.

Неканонические гироприборы открывают новые возможности для вакуумной электроники. В работе обсуждается перспективность некоторых неканонических гироприборов с дискретной и непрерывной перестройкой частоты. Рассматриваемые неканонические гиротроны не являются в достаточной мере освоенными приборами, но, вместе с этим, имеют свои уникальные преимущества и свои специфические приложения. Эшелеттные гиротроны перспективны не только для повышения выходной мощности и частоты генерации, но и для непрерывной перестройки частоты, что становится актуальным при работе в субтерагерцовом диапазоне. Переход в терагерцовом диапазоне к системам с криогенно охлаждаемыми резонаторами позволяет существенно повысить КПД гиротрона и улучшить селективность рабочей моды. Секционирование активной среды электродинамических систем расширяет возможности гироприборов. В частности, предложена новая схема многолучевого многоствольного гиротрона, позволяющая реализовать непрерывную перестройку частоты в широком диапазоне частот. Данные исследования способствуют созданию нового поколения гироприборов для широкого спектра научных и технических приложений.

Практическая значимость заключается в том, что используемые подходы, методики расчёта и созданные программы могут быть использованы при разработке новых субтерагерцовых и терагерцовых гироприборов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная оптимизация электронно-оптической и электродинамической систем позволяет реализовать субтерагерцовые гиротроны с широкополосной дискретной перестройкой частоты в диапазоне 100-260 ГГц с мощностью выходного излучения более

120 кВт при работе на первой циклотронной гармонике с учётом ограничений, налагаемых магнитной системой JASTEC-10T100.

2. Применение аксиально-симметричных эшелеттных резонаторов благодаря своим селективным свойствам позволяет осуществить в субтерагерцовых гиротронах непрерывную перестройку частоты в диапазоне 1,5% при работе на первой циклотронной гармонике на частоте 152 ГГц и перестройку около 0.5% при работе на второй циклотронной гармонике с частотой генерации 303 ГГц.

3. В субтерагерцовых и терагерцовых гиротронах возможно снижение доли омических потерь в резонаторе гиротрона за счёт его охлаждения до криогенных температур. В случае гиротрона с частотой генерации 500 ГГц охлаждение резонатора до криогенных температур приводит к росту волнового КПД в 1,5 раза.

4. Секционирование активной среды электродинамических систем расширяет возможности giroприборов. В частности, предложена новая схема многолучевого многоствольного гиротрона, позволяющая реализовать непрерывную перестройку частоты в диапазоне 133-146 ГГц.

Апробация работы и публикации. Результаты работы представлялись на следующих конференциях, семинарах, научных школах:

- 19ая, 20ая, 21ая, 22ая научные конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.);
- X, XI Всероссийские семинары по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2016, 2019 гг.);
- 28th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons (Nizhniy Novgorod, 2016 y.);
- V, VII Всероссийские научно-технические конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, СпбГЭТУ, 2016, 2018 гг.);
- XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2018 г.);
- 3rd International Conference Terahertz and Microwaves Radiation: Generation, Detection and Application (TERA-2018), Nizhniy Novgorod, October 22-25, 2018;
- научно-техническая конференция «Мощные вакуумные СВЧ приборы-2019» (Москва, АО «НПП» Торий, 22-23 мая 2019 г.).

Результаты научно-квалификационной работы использовались при выполнении научных проектов, поддержанных грантами РФФИ (№№ 15-42-02380 p_поволжье_a, 16-32-00166 мол_a, 19-02-00832 А, 18-32-00772 мол_a), грантом РНФ (№ 17-79-10422). По теме работы опубликовано 28 работ [A1-A28], из них 3 статьи в рецензируемых журналах, 4 статьи в сборниках трудов конференций, 21 тезисов докладов.

Личный вклад автора в проведенные исследования. Все результаты, включенные в научно-квалификационную работу и вошедшие в работы [A1-A28], получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автору принадлежит постановка части решенных задач, вывод всех аналитических выражений, разработка алгоритма и программ для ЭВМ, выполнение большинства численных расчётов. Постановка большинства решённых задач принадлежит научному руководителю В. Е. Запезалову. Разработка электронно-оптической систем для частотно-перестраиваемых гиротронов, описанных в первой главе, проведена совместно с О. П. Планкиным и Е. С. Семеновым при помощи разработанного в ИПФ РАН комплекса программ ANGEL-2DS. Постановка задачи и анализ результатов, касающихся разработки частотно-перестраиваемых эшелетных гиротронов, были выполнены совместно с С. Н. Власовым. Исследования отражательных способностей различных материалов при помощи резонансного спектрометра [36] проведены В. В. Паршиным и Е. А. Серовым. Вклад остальных соавторов в публикациях, выполненных совместно и приведенных в списке трудов автора, состоит в получении результатов, не включенных в научно-квалификационную работу.

Структура и объем работы. Научно-квалификационная работа состоит из Введения, двух глав, Заключения, Списка литературы. Общий объём научно-квалификационной работы 88 страниц, включая 48 рисунков, 15 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы её цели, научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость, сведения об апробации работы и публикациях автора, структуре работы.

Первая глава научно-квалификационной работы посвящена разработке частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов разной мощности. Гиротроны спроектированы для существующего в ИПФ РАН гиротронного комплекса на основе криомагнита JASTEC-10T100, имеющего максимальное магнитное поле 10 Тл и проходное отверстие 100 мм. В первом пункте этой главы описаны основные принципы осуществления ступенчатой перестройки частоты в субтерагерцовых гиротронах.

Задачу разработки гиротрона со ступенчатой перестройкой частоты можно разделить на четыре подзадачи: формирование электронного пучка с требуемыми характеристиками; обеспечение эффективного взаимодействия электронного пучка; разработка квазиоптического преобразователя; разработка широкополосного выходного окна. В данной работе внимание преимущественно уделено совместному рассмотрению

первых двух подзадач, при этом практически не обсуждается остальные. Обсуждаются особенности гиротронов разного уровня мощности.

В пункте 1.2 подробно обсуждается возможность реализации частотно-перестраиваемого гиротрона высокой мощности, работающего на 27 различных модах в предельно широком диапазоне частот 97-261 ГГц. В параграфе 1.2.1 указаны основные параметры данного гиротрона, обсуждается модель расчёта электронно-волнового взаимодействия, в параграфе 1.2.2 рассмотрены различные стартовые сценарии.

Для эффективного перекрытия указанного диапазона частот выбрана последовательность рабочих мод от $TE_{9,3}$ до $TE_{18,9}$. Данные моды выделены кружочками на рисунке 1, на котором указаны оптимальные радиусы электронных пучков и собственные частоты мод гиротрона. Каждой пунктирной кривой на рисунке 1 соответствуют множество мод с одним радиальным индексом p , каждая точка на этих кривых соответствует собственной моде резонатора со своим азимутальным индексом m . Штрих-пунктирные кривые (согласно адиабатической теории) показывают диапазон возможных изменений радиуса пучка за счёт добавления корректирующей катушки с максимальным магнитным полем в области катода до 0,06 Тл. Параграф 1.2.3 посвящён разработке магнетронно-инжекторной пушки (МИП) частотно-перестраиваемого субтерагерцового гиротрона. Обсуждается влияние пространственного заряда на качество электронного пучка и различные способы снижения плотности тока вблизи катода. В параграфе 1.2.4 представлены основные результаты исследования процессов электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона.

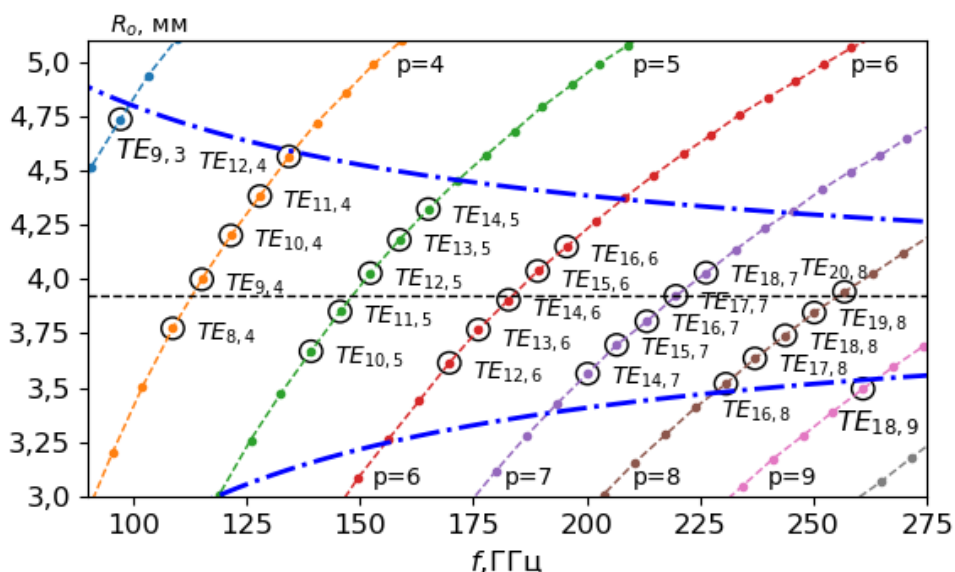


Рисунок 1. Оптимальные радиусы и частоты рабочих мод.

Расчётная эффективность работы гиротрона составила 20-44% в зависимости от рабочей моды, при этом мощность выходного излучения для большей части мод превысила 200 кВт (см. рис. 2). При работе на модах $TE_{9,3}$, $TE_{8,4}$, $TE_{9,4}$ из-за недостаточной длины пространства взаимодействия мощность выходного излучения при оптимальном магнитном поле снижается до 120 кВт с волновым КПД 20%. Основным ограничением на мощность выходного излучения при работе на модах с относительно высокими частотами является значительная тепловая нагрузка на стенки резонатора (рисунок 3). Серьёзной проблемой при разработке МИП для мощного частотно-перестраиваемого гиротрона с высокими рабочими токами является разброс поперечных скоростей электронов, который увеличивается при уменьшении анодного напряжения, приводит к росту отношения тока пучка к току Чайлда-Ленгмюра t_j и ограничивает диапазон перестройки частоты.

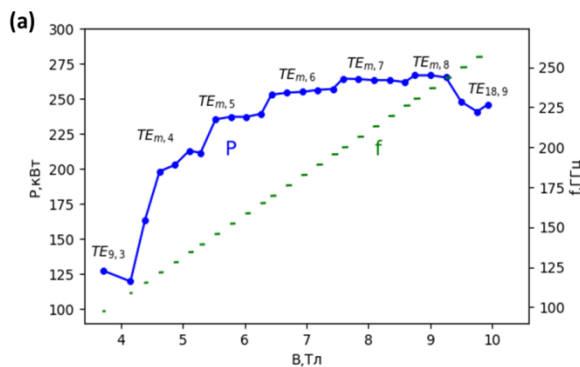


Рисунок 2. Зависимость мощности выходного излучения и частоты генерации от магнитного поля.

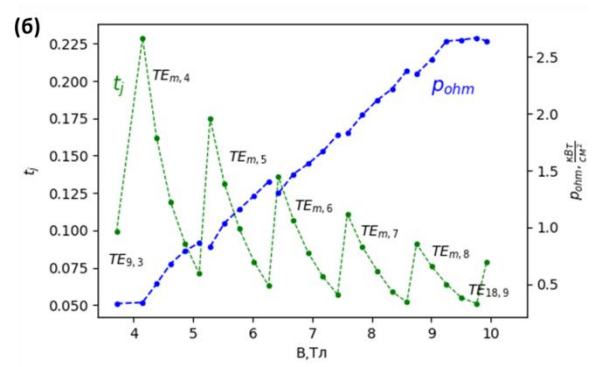


Рисунок 3. Параметр t_j и удельная тепловая нагрузка в зависимости от магнитного поля.

В следующем параграфе рассмотрена возможность повышения КПД гиротрона за счёт одноступенчатой генерации, а также рассмотрены два варианта коллекторных систем: цилиндрического коллектора и конического коллектора с системой дополнительных коллекторных катушек.

В пункте 1.3 рассмотрен вариант частотно-перестраиваемого гиротрона для работы в интервале частот 0,2-0,27 ТГц с мощностью выходного излучения более 200 Вт в непрерывном режиме. Исследована возможность широкополосной перестройки частоты генерируемого излучения за счёт возбуждения последовательности мод с близкой каустикой посредством изменения магнитного поля и возможность плавной перестройки за счёт возбуждения мод с большим числом продольных вариаций. Итоговый КПД для выбранных параметров пучка и электродинамической системы с учётом одноступенчатой рекуперации составляет 21,7-26% для мод $TE_{20,8}$ - $TE_{16,6}$ соответственно. Ограничение

эффективности в основном обусловлено высокими омическими потерями. Некоторые варианты решения этой проблемы рассмотрены в пункте 2.2. В случае мод с двумя продольными вариациями, рекуперация энергии отработанного электронного пучка позволяет повысить КПД гиротрона более чем в два раза до 5,5-9,35% в зависимости от рабочей моды. Посредством возбуждения мод с несколькими продольными вариациями ВЧ-поля и при помощи дополнительной подстройки частоты за счёт управления температурой резонатора возможна непрерывная подстройка от 0,27 ГГц до 0,44 ГГц в зависимости от рабочей моды.

Во **второй** главе рассмотрены неканонические гироприборы с дискретной и непрерывной перестройкой частоты. Эшелеттные гиротроны являются перспективными приборами для повышения мощности выходного излучения и увеличения частоты генерации. **Первый пункт** второй главы посвящён гиротронам с эшелеттными резонаторами. Предложена новая методика расчёта эшелеттных гиротронов. В рамках новой методики показана возможность непрерывной частотной перестройки в диапазоне 152-154,5 ГГц при работе на первой циклотронной гармонике и в диапазоне 302-303,8 ГГц при работе на второй гармонике гирочастоты. Вариант эшелеттного гиротрона, работающего на третьей циклотронной гармонике на частоте 469,6 ГГц рассмотрен в параграфе 2.1.3.

В **пункте 2.2** проанализирована специфика влияния омических потерь на работу гиротронов субтерагерцового и терагерцового диапазонов. Обсуждается влияние роста доли омических потерь при продвижении гиротронов в терагерцовый диапазон на эффективность его работы и на селекцию рабочего типа колебаний. Рассмотрена возможность понижения доли омических потерь в резонаторах субтерагерцовых гиротронов малой мощности за счёт выбора материала резонатора и за счёт его охлаждения до криогенных температур. Для расчёта омических потерь в резонаторах гиротронов, работающих в разных частотных диапазонах, использованы результаты исследования отражательной способности различных металлов. Измерения выполнены при помощи спектрометра на базе высокочастотного резонатора Фабри-Перо [36], позволяющего проводить измерения в диапазоне температур от 4 К до 370 К. Схема спектрометра изображена на рисунке 4. Основные результаты расчётов для варианта гиротрона с частотой генерации 500 ГГц представлены на рисунке 5. Переход к высокочистой меди позволяет снизить долю омических потерь с 51% до 45,8%, что приводит к повышению выходного КПД с 12,6% до 14,5%. Охлаждение резонатора гиротрона до криогенных температур позволяет повысить КПД с 12,6% до 18,1%. Для гиротронов с криогенно охлаждаемыми резонаторами перспективным материалом

становится чистый (0.9999) алюминий, который в случае его охлаждения до криогенных температур имеет характеристики, приближённые к высокочистой меди. Таким образом, перспективным методом борьбы с высокой долей омических потерь для гиротронов субтерагерцового и терагерцового диапазонов является охлаждение резонатора до криогенных температур.

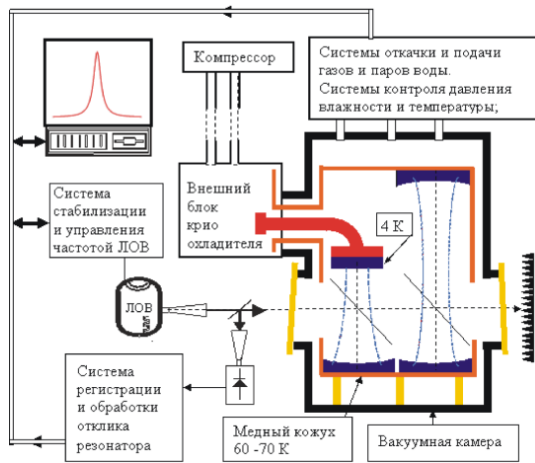


Рисунок 4. Схема резонаторного спектрометра.

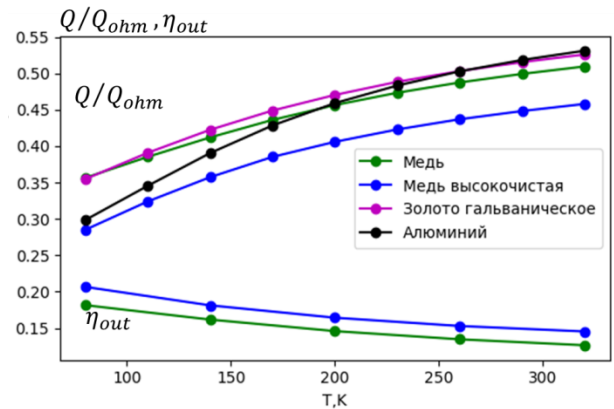


Рисунок 5. Расчётное изменение доли омических потерь, КПД гиротрона при охлаждении резонатора до криогенных температур

Пункт 2.3 посвящён двухлучевым гиротронам. В параграфе 2.3.1 с точки зрения перспективности для спектроскопии и диагностики плазмы рассмотрены несколько проектов гиротронов с двухлучевыми МИП разных частотных диапазонов с различным уровнем выходной мощности. Проанализирована возможность реализации одновременной двухчастотной генерации в таких гироприборах. Проведено сравнение эффективности двухлучевого гиротрона и гиротрона с одним электронным пучком. В параграфе 2.3.2 представлены результаты теоретических исследований возможности использования двухлучевых систем для разработки частотно-перестраиваемых гиротронов терагерцового диапазона частот. На примере гиротрона с рабочими модами $TE_{17,8} - TE_{26,6}$ показана возможность использования дуолучевых систем для реализации частотно-перестраиваемого гиротрона, работающего в интервале частот 243-265 ГГц.

В **пункте 2.4** рассмотрена одна из перспективных схем многолучевого многоствольного гиротрона. Многолучевой многоствольный гироприбор может быть реализован в виде системы с несколькими цилиндрическими резонаторами, в каждый из которых влетает свой приосевой электронный пучок. При этом каждый резонатор по отдельности работает подобно гиротрону с большой орбитой [70]. Данный вариант многоствольного гироприбора является перспективным для перестройки и повышения рабочей частоты. Качественно прибор изображен на рисунке 6. В качестве примера

рассмотрены три перспективных варианта реализации многолучевого многоствольного гиротрона данного типа для задач по перестройке и повышения рабочей частоты. В параграфе 2.4.2 предложен вариант системы с пятью резонаторами с изменёнными относительно друг друга радиусами с базовой частотой 140 ГГц с непрерывной перестройкой частоты в интервале 13,1 ГГц. На рисунке 7 показана зависимость мощности выходного излучения от частоты генерации для этого варианта гиротрона. В следующем параграфе рассмотрен вариант частотно-перестраиваемого многоствольного гиротрона с изолированными резонаторами, позволяющими избежать многочастотной генерации. В параграфе 2.4.4 показана возможность работы многоствольного гиротрона данного типа на третьей циклотронной гармонике на частоте генерации 499,6 ГГц с мощностью выходного излучения 180 Вт.

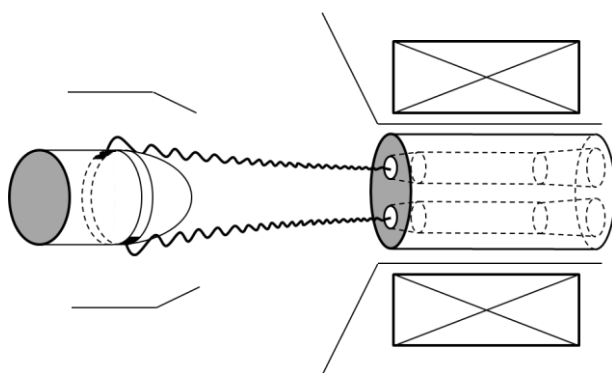


Рисунок 6. Схема многолучевого многоствольного гиротрона

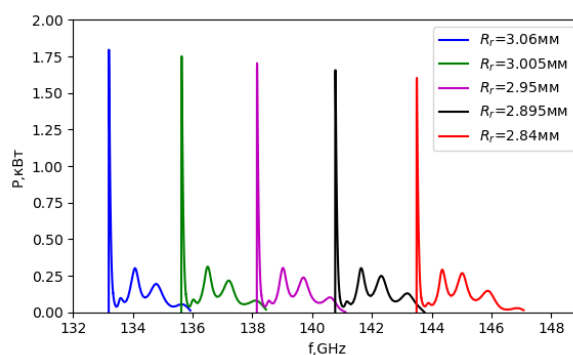


Рисунок 7. Расчетная мощность выходного излучения в пятиствольном гиротроне в зависимости от частоты генерации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Спроектирован частотно-перестраиваемый гиротрон для работы в широком интервале частот (0,1-0,261 ТГц) с выходной мощностью до 260 кВт с учётом ограничений, налагаемых магнитной системой JASTEC-10T100.

2. Спроектирован маломощный частотно-перестраиваемый гиротрон со сверхразмерным резонатором, предназначенный для работы в интервале частот 0,2-0,27 ТГц с выходной мощностью более 200 Вт. Исследованы возможности дискретной и плавной перестройки частоты генерируемого излучения в данном гиротроне.

3. Показана возможность непрерывной частотной перестройки в гиротроне с эшелеттным резонатором. Для рассматриваемого варианта эшелеттного гиротрона возможна перестройка частоты в диапазоне 152-154,5 ГГц при работе на первой циклотронной гармонике и в диапазоне 302-303,8 ГГц при работе на второй гармонике гирочастоты.

4. Показано, что охлаждение резонаторов субтерагерцовых гиротронов до криогенных температур позволяет существенно снизить долю омических потерь. В частности, охлаждение резонатора гиротрона, работающего на частоте 500 ГГц до криогенных температур позволяет повысить КПД с 12,6% до 18,1%.

5. Предложена принципиально новая схема многолучевого многоствольного гироприбора с несколькими резонаторами, каждый из которых работает подобно гиротрону с приосевым электронным пучком. В качестве примера показана возможность реализации рекордного для гиротронов диапазона непрерывной частотной перестройки 13.1 ГГц в таких системах.

СПИСОК ТРУДОВ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

А1. Запевалов В. Е., Зуев А. С. Субтерагерцовые многочастотные гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы. // Труды Девятнадцатой научной конференции по радиофизике, 11-15 мая 2015, г. Нижний Новгород, ННГУ. С. 52.

А2. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Зуев А. С., Седов А. С. Многочастотные субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы. // Тезисы докладов X Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 29 февраля - 3 марта 2016, г. Нижний Новгород, ИПФ РАН. С. 131.

А3. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Зуев А. С., Седов А. С. Численное моделирование процессов в резонаторах субтерагерцовых многочастотных гиротронов для спектроскопии и диагностики плазмы. // Труды Двадцатой научной конференции по радиофизике, 12-20 мая 2016, г. Нижний Новгород, ННГУ. С. 60.

А4. Запевалов В. Е., Зуев А. С., Планкин О. П., Семенов Е. С. Проектирование электронно-оптических систем для субтерагерцовых многочастотных гиротронов. // Труды Двадцатой научной конференции по радиофизике, 12-20 мая 2016, г. Нижний Новгород, ННГУ. С. 62.

А5. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Зуев А. С., Седов А. С. Многочастотные субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы. // Сборник статей V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 30 мая — 2 июня 2016, г. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ. Т. 2. С. 247.

А6. Запевалов В. Е., Зуев А. С. Двухлучевые субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы. // Труды Двадцать первой научной конференции по радиофизике, 15-22 мая 2017, г. Нижний Новгород, ННГУ. С. 75.

А7. Зуев А. С., Лещева К. А., Седов А. С. Влияние наклона ведущего магнитного поля на электронно-волновое взаимодействие в резонаторах терагерцовых гиротронов. // Материалы 27-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2017), 11—15 сентября, г. Севастополь. С. 1191.

А8. Глявин М. Ю., Запевалов В. Е., Зуев А. С., Зотова И. В., Мануилов В. Н., Малкин А. М., Седов А. С., Сергеев А. С., Фокин А. П. // Теоретическое и экспериментальное исследование многолучевых гиротронов. Материалы XVII международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, 5-10 февраля 2018, г. Саратов. С. 31.

А9. Запевалов В. Е., Зуев А. С. Многочастотные многолучевые и многоствольные гиротроны. // Труды Двадцать второй научной конференции по радиофизике, 17-24 мая

2018, г. Нижний Новгород, ННГУ. С. 103.

A10. Зуев А. С., Железнов И. В., Ошарин И. В., Проявин М. Д. и Розенталь Р. М. Влияние слабой конусности резонатора на частотные характеристики субтерагерцового гиротрона. // Труды Двадцать второй научной конференции по радиофизике, 17-24 мая 2018, г. Нижний Новгород, ННГУ. С. 106.

A11. Зуев А. С., Ошарин И. В. Особенности работы гиротронов с обращённым выводом энергии. // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 28-31 мая 2018, г. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ. С. 193.

A12. Зуев А. С., Железнов И. В., Ошарин И. В., Проявин М. Д. и Розенталь Р. М. Расчёт и экспериментальное исследование частотных характеристик субтерагерцового непрерывного гиротрона. // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 28-31 мая 2018, г. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ. С. 705.

A13. Запевалов В. Е., Зуев А. С., Седов А. С., Фокин А. П. Применение многолучевых систем для разработки частотно перестраиваемых терагерцовых гиротронов. // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 28-31 мая 2018, г. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ. С. 709.

A14. Fedotov A. E., Zotova I. V., Glyavin M. Yu., Rozental R. M., Zuev A. S., Ginzburg N. S., Sergeev A. S., and Idehara T. Frequency Tunable sub-THz Gyrotrons for Spectroscopy Applications. // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 187. P. 01025.

A15. Sedov A. S., Zuev A. S., Semenov E. S., Bogdashov A. A. and Fokin A. P. The project of W-band gyrotron at third cyclotron harmonic with an annular diaphragm. // Results in Physics. 2018. V. 11. P. 158.

A16. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Зуев А. С., Планкин О. П., Седов А. С. и Семенов Е. С. Анализ методов дискретной и плавной перестройки частоты в гиротронах для спектроскопии на примере генератора диапазона 0,2-0,27 ТГц. // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 6. С. 494.

A17. Glyavin M. Yu., Proyavin M. D., Sedov A. S., Semenov E. S., Zuev A. S. and Tsvetkov A. I. Development of middle-power W-band gyrotron in IAP RAS. // Abstracts of The 40th PIERS, Toyama, Japan, 1-4 August, 2018.

A18. Bogdashov A. A., Fokin A. P., Sedov A. S., Zuev A. S. The third harmonic medium power W-band gyrotron for various applications. // Book of abstracts of ALT'18, September 9-14, 2018, Spain, Tarragona. P. 170.

A19. Zuev A. S., Fokin A. P., Glyavin M. Y., Rozental R. M., Sedov A. S. and Semenov E. S. The project of third harmonic medium power W-band gyrotron. // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 195. P. 01024.

A20. Glyavin M. Yu., Fedotov A. E., Rozental R. M., Zotova I. V., Zuev A. S., Manuilov V. N., Tretyakov M. Yu. and Makarov D. S. Gyrotrons with Shortened Cavities as Tunable Sources of Powerful Sub-Terahertz Radiation for Spectroscopic Application. // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 195. P. 01024.

A21. Запевалов В. Е., Зуев А. С. и Куфтин А. Н. Секционирование активной среды для перестройки и повышения рабочей частоты гиротронов (многолучевые и многоствольные схемы). // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 25 – 28 февраля 2019, г. Нижний Новгород, ИПФ РАН. С. 19.

A22. Власов С. Н., Запевалов В. Е., Зуев А. С., Куфтин А. Н., Копосова Е. В. и Павельев А. Б. Исследование электронной перестройки частоты в гиротроне с эшелетным резонатором. // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 25 – 28 февраля 2019, г. Нижний Новгород, ИПФ РАН. С. 67.

A23. Железнов И. В., Зуев А. С. и Ошарин И. В. Особенности перестройки частоты в гиротронах с секционированными резонаторами. // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 25 – 28 февраля 2019, г. Нижний Новгород, ИПФ РАН. С. 70.

A24. Запевалов В. Е., Зуев А. С., Паршин В. В. и Серов Е. А. Уменьшение омических потерь в резонаторах субтерагерцовых гиротронов малой мощности. // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 25 – 28 февраля 2019, г. Нижний Новгород, ИПФ РАН. С. 71.

A25. Запевалов В. Е., Зуев А. С., Паршин В. В. и Серов Е. А. Уменьшение доли омических потерь в резонаторах маломощных гиротронов субтерагерцового диапазона. // Труды Двадцать третьей научной конференции по радиофизике, 13 - 17 мая 2019, г. Нижний Новгород, ННГУ. Направлено в печать.

A26. Власов С. Н., Запевалов В. Е., Зуев А. С., Куфтин А. Н., Копосова Е. В. и Павельев А. Б. Исследование частотно-перестраиваемых гиротронов с эшелетными резонаторами. Труды научно-технической конференции «Мощные вакуумные СВЧ приборы-2019», 22 - 23 мая 2019, г. Москва. С. 15

A27. Запевалов В. Е., Зуев А. С., Планкин О. П., Семенов Е. С. Разработка многочастотного субтерагерцового гиротрона высокой мощности в условиях

ограничений, налагаемых магнитной системой. Труды научно-технической конференции «Мощные вакуумные СВЧ приборы-2019», 22 - 23 мая 2019, г. Москва. С. 16.

A28. Запевалов В. Е., Зуев А. С., Планкин О. П. и Семенов Е. С. Оптимизация перестраиваемого в широком диапазоне частот субтерагерцового гиротрона высокой мощности при ограничениях, налагаемых магнитной системой. // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Принято к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братман В. Л., Литвак В. Г. и Суворов Е. В. Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения. // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 8. С. 867.
2. Kumar N., Singh U., Singh T. P. and Sinha A. K. A review on the applications of high power, high frequency microwave source: gyrotron. // Journal of Fusion Energy. 2011. V. 30, №. 4. P. 257.
3. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред. // Успехи физических наук. 2016. Т. 186, № 6. С. 667.
4. Lewis R. A. A review of terahertz sources. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2014. V. 47, № 37. P. 374001.
5. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., et al. Vacuum electronic high power terahertz sources. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2011. V. 1, № 1. P. 54.
6. Becerra L. R., Gerfen G. J., Temkin R. J., et al. Dynamic nuclear polarization with a cyclotron resonance maser at 5 T. // Physical Review Letters. 1993. V. 71, №. 21. P. 3561.
7. Bajaj V. S., Farrar C. T., Hornstein M. K., et al. Dynamic nuclear polarization at 9T using a novel 250GHz gyrotron microwave source. // Journal of Magnetic Resonance. 2003. V. 160. P. 85.
8. Ni Q., Daviso Eu., et al. High frequency dynamic nuclear polarization. // Accounts of Chemical Research. 2013. V. 46, № 9. P. 1933.
9. Dumbrajs O., Heikkinen J. A. and Zohm H. Electron cyclotron heating and current drive control by means of frequency step tunable gyrotrons. // Nuclear Fusion. 2001. V. 41, № 7. P. 927.
10. Nusinovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004. 336 p.
11. Запевалов В. Е. Эволюция гиротронов // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 559.
12. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A. and Petelin M. I. The gyrotron at 50:

historical overview. // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2014. V. 35, № 4. P. 325.

13. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запечалов В. Е. и др. Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы. // *Радиотехника и электроника*. 2014. Т. 59, № 8. С. 745.

14. Гольденберг А. Л., Денисов Г. Г., Запечалов В. Е. и др. Мазеры на циклотронном резонансе: состояние и перспективы. // *Известия вузов. Радиофизика*. 1996. Т. 39, № 6. С. 635.

15. Torrezan A. C., Shapiro, M. A., Sirigiri J. R., et al. Operation of a continuously frequency-tunable second-harmonic CW 330-GHz gyrotron for dynamic nuclear polarization. // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2011. V. 58, № 8. P. 2777.

16. Qi X.-B., Du C.-H., Liu P.-K. Broadband continuous frequency tuning in a terahertz gyrotron with tapered cavity. // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015. V. 62, № 12. P. 4278.

17. Sabchevski S. P., Idehara T. A numerical study on finite-bandwidth resonances of high-order axial modes (HOAN) in gyrotron cavity. // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015. V. 36, № 7. P. 628.

18. Fedotov A. E., Rozental R. M., Zotova I. V., et al. Frequency tunable sub-THz gyrotron for direct measurements of positronium hyperfine structure. // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2018. V. 39, № 10. P. 975.

19. Brand G. F., Douglas N. G., Gross M., et al. Tuneable millimeter-wave gyrotrons. // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1982. V. 3, № 5. P. 725.

20. Hong K. D., Brand G. F., and Idehara T. A 150–600 GHz step-tunable gyrotron. // *Journal of Applied Physics*. 1993. V. 74, № 8. P. 5250.

21. Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S., et al. Development of frequency tunable, medium power gyrotrons (Gyrotron FU series) as submillimeter wave radiation sources. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1999. V. 27, № 2. P. 340.

22. Запечалов В. Е., Богдашов А. А., Денисов Г. Г. и др. Разработка прототипа многочастотного мегаваттного гиротрона в диапазоне 105-156 ГГц. // *Известия вузов. Радиофизика*. 2004. Т. 47, № 5-6. С. 443.

23. Thumm M., Arnold A., Borie E., et al. Frequency step-tunable (114–170 GHz) megawatt gyrotrons for plasma physics applications. // *Fusion Engineering and Design*. 2001. V. 53. P. 407.

24. Запечалов В.Е. Неканонические гиротроны // *Известия вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 4. С. 1305.

25. Косарев Е.Л. Открытый резонатор с эшелетной решеткой. // *Письмо в*

ЖЭТФ. Т. 3, № 7. С. 295.

26. Власов С. Н., Копосова Е. В., Павельев А. Б., Хижняк В. И. Гиротроны с эшелеттными резонаторами. // Известия вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 691.

27. Власов С. Н., Копосова Е. В. Аксиально-симметричные ступенчатые резонаторы. // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 804.

28. Агапов Л. Н., Богданов С. Д., Венедиктов Н. П. и др. Электронная перестройка рабочей частоты гиротрона с эшелетной структурой. // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 7. С. 489.

29. Запевалов В. Е., Цимринг Ш. Е. Многолучевые гиротроны. // Известия вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33, №11. С. 1288.

30. Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A., et al. A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy. // Review of Scientific Instruments. 2017. V. 88, № 9. P. 094708.

31. Bandurkin I. V., Glyavin M. Y., Idehara T., and Savilov A. V. Double-beam gyrotron with frequency multiplication. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2019. doi: 10.1109/TED.2019.2905047.

32. Liu D., Yan Y., Yu S., et al. Experimental and theoretical investigations on coaxial gyrotron with two electron beams. // Terahertz Science and Technology. 2015. V. 8, № 2. P. 50.

33. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 с.

34. Королев А.Н., Зайцев С.А., Румянцев А.С. и Победоносцев А.С. Исследование и проектирование нового класса ЭВП СВЧ – компактных многолучевых многосекционных ЛБВ Ка – диапазона мощностью 100-700 Вт. // Материалы научно-технической конференции “Электронные приборы СВЧ”. Саратов. 24-25 октября 2001. С. 12.

35. Jerby E., Kesar A., Korol M., et al. Cyclotron-resonance-maser arrays. // IEEE transactions on plasma science. 1999. V. 27, № 2. P. 11.

36. Паршин В. В., Серов Е. А., Бубнов Г. М. и др. Криовакуумный резонаторный комплекс. // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8-9. С. 614.