Министерство образования и науки Российской Федерации

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Под редакцией А.Е. Храмова, А.Г. Баланова, В.Д. Еремки, В.Е. Запевалова, А.А. Короновского

Саратов 2016

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского *А.Н. Павлов* Доктор физико-математических наук, профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. *В.Б. Байбурин*

Одобрено редакционно-издательским советом Саратовского государственного технического университета

Г 34 Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона: колл. монография / под ред. А.Е. Храмова, А.Г. Баланова, В.Д. Еремки, В.Е. Запевалова, А.А. Короновского. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2016. 460 с. ISBN 978-5-7433-3013-3

В данной коллективной монографии описаны и обобщены текущие тенденции в разработке и исследовании приборов и устройств субтерагерцового и терагерцового диапазонов. Подготовка данного издания была выполнена в рамках проведения работ по гранту Российского научного фонда (проект № 14-12-00222).

Для аспирантов, студентов старших курсов, инженеров, а также всех интересующихся проблемами в области СВЧ электроники, радиофизики и нелинейной динамики.

УДК 535-1 ББК 22.34

© Саратовский государственный технический университет, 2016

© Коллектив авторов, 2016

ISBN 978-5-7433-3013-3

оглавление

Предисловие	4
Глава 1. Терагерцовые технологии и их приложения. А.Г. Баланов, В.Е. Запевалов, А.Е. Храмов	8
Глава 2. Терагерцовые гиротроны. В.Е. Запевалов, М.Ю. Глявин	68
Глава 3. Моделирование ЛБВ и ЛОВ на волнообразно изогнутых пря- моугольных волноводах в терагерцовом диапазоне частот. <i>А.В. Аксенчик, А.А. Кураев, И.Ф. Киринович, В.Е. Запевалов</i>	108
Глава 4. Оротрон и его модификации. Е.А. Мясин	160
Глава 5. Клистроны, наноклистроны и нановиркаторы субтерагерцо- вого и терагерцового диапазонов. А.В. Аксенчик, В.Д. Ерёмка, И.К. Кузьмичев, А.А. Кураев, С.А. Куркин, Л.В. Огаркова, Н.С. Фролов, А.Е. Храмов	195
Глава 6. Импульсные магнетроны субтерагерцового и терагерцово- го диапазонов. В.Д. Ерёмка, В.Д. Науменко	238
Глава 7. Мощные пучково-плазменные системы с виртуальным ка- тодом и перспективы их продвижения в суб-ТГц и ТГц диапа- зоны. А.А. Бадарин, А.А. Короновский, С.А. Куркин, Г.А. Петрик, Н.С. Фролов, А.Е. Храмов	283
Глава 8. Устройства суб-ТГц диапазона на основе полупроводнико- вых сверхрешеток. А.Г. Баланов, А.А. Короновский, В.В. Мака- ров, В.А. Максименко, А.Е. Руннова, А.О. Сельский, М. Фромхолд, А.Е. Храмов	325
Глава 9. Эффективный способ генерации ТГц излучения сверхпро- водящими мезоструктурами. Х. Фархан-Хассан, В. Антонов, О. Кусмарцева, М. Гайфуллин, В. Кошелец, Д. Гулевич, П. Дмитриев, Ф.В. Кусмарцев	366
Глава 10. Нелинейная динамика оптических генераторов излучения терагерцового диапазона. Л.А. Кочкуров, А.И. Конюхов, Ю.А. Мажирина, Л.А. Мельников, В.В. Астахов, М.И. Балакин	382
Глава 11. Лазеры терагерцового диапазона с оптической накачкой. <i>А.В. Дегтярев, В.А. Маслов, А.Н. Топков</i>	404

Глава 2. ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ

В.Е. Запевалов, М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Выполнен обзор современного состояния разработок терагерцовых гиротронов и основных приложений. Проанализированы основные тенденции их дальнейшего развития и проблемы на этом пути. Сформулированы основные проблемы, препятствующие повышению мощности, эффективности и частоты гиротронов и перспективные подходы к их решению. Проведен анализ физических процессов в терагерцовых гиротронах, отмечены особенности и преимущества той или иной конструкции приборов. Отмечены особенности некоторых оригинальных конструкций. Показано, что возможности дальнейшего развития гироприборов в терагерцовом диапазоне частот как в непрерывном, так и в импульсном режиме далеко не исчерпаны (0.1-3 ТГц).

2.1. Особенности гиротронов в терагерцовом диапазоне частот

Одними из наиболее перспективных приборов в терагерцовом (и субтерагерцовом) диапазоне являются мазеры на циклотронном резонансе – устройства, основанные на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле [1]. Наиболее известным и широко распространенным вариантом МЦР является гиротрон [2], основными особенностями которого является использование адиабатической магнетронно-инжекторной пушки (МИП) с сильной компрессией электронного потока и открытого высокоселективного резонатора с дифракционным выводом энергии. Гиротроны намного более компактны, чем лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), а принцип их работы основан на взаимодействии между электронами, вращающимися во внешнем магнитном поле, и электромагнитной волной в условиях циклотронного резонанса.

Механизм излучения, на котором основаны МЦР, описан во многих работах (см. например [1-7]).Общая схема гиротрона приведена на рис. 2.1. 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, включающая согласованное выходное окно и во многих случаях квазиоптический преобразователь рабочей моды в узконаправленный волновой пучок [8] (рис. 2.1 б). Для работы гиротрона необходима магнитная система (обычно в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне используются криомагниты или импульсные магниты), создающая магнитное поле для формирования электронного потока и обеспечения резонансного взаимодействия электронов с высокочастотным полем.



Рисунок 2.1. Общая схема гиротрона: *a* - с прямым (осевым) выводом мощности, *б* – со встроенным квазиоптическим преобразователем и радиальным выводом мощности

В гиротроне энергия вращения электронов в сильном магнитном поле переходит в ВЧ излучения в условиях гирорезонанса

$$\omega \approx n\omega_h + hv_{//} , \qquad (2.1)$$

где ω_H и $v_{//}$ – циклотронная частота (гирочастота) и дрейфовая скорость электронов, n – номер циклотронной гармоники. Взаимодействие электронного пучка с одной из собственных мод круглого волновода $\text{TE}_{m,p}$ происходит около частоты отсечки [2-9] ($h \approx 0$), т. е. фактически здесь име-

ется резонатор гиротрона, образованный слабонерегулярным отрезком цилиндрического волновода с рабочими модами $TE_{m,p,q}$, причем для рабочей моды, как правило, q = 1, и поэтому в дальнейшем при равенстве единице опускается. 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, обеспечивается слабая чувствительность к скоростному разбросу электронов. Для реализации условия циклотронного резонанса в ТГц диапазоне частот гиротроны должны работать либо при наличии очень сильных магнитных полей, либо на гармониках циклотронной частоты электронов.

Мощность и КПД гиротрона определяются следующими выражениями:

$$P = \eta I U, \qquad (2.2a)$$

$$\eta = t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_{C} \eta_{W} Q_{ohm} / (Q_{ohm} + Q_{d})$$
(2.26)

где *I* и *U* - ток и ускоряющее напряжение, η_{\perp} и η_{c} – поперечный КПД [3-9] и коэффициент преобразования встроенного преобразователя, t_{\perp} – отношение осцилляторной энергии электронов к полной, Qohm и Qd – дифракционная и омическая добротности, η_w - коэффициент пропускания выходного окна. Величины I и t₁ определяются системами формирования и транспортировки винтового электронного пучка (ВЭП). Отметим, что с повышением рабочей частоты практически все величины, определяющие мощность и эффективность гиротрона (см. (2.2)), в той или иной мере снижаются, и требуются серьезные усилия для поддержания характеристик гиротрона на приемлемом уровне. В результате многолетних исследований, конструкторских и технологических разработок в гиротронах были реализованы высокие уровни КПД (до 70% в системах с одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов [8, 9]) и мощность (2 МВт на частоте 0,17 ТГц [9, 10] и 0,2 МВт на частоте 0,67 ТГц [11, 12]). Таким образом, мощность и эффективность излучения гиротронов на несколько порядков превосходят мощности твердотельных генераторов [13-16] и классических приборов вакуумной электроники (ЛОВ, оротроны и клинотроны [13-15]), а размеры, рабочие напряжения и стоимость значительно ниже, чем в ЛСЭ [9]. На рис. 2.2, подготовленном на основании доклада профессора Р.Темкина [17], представлены достигнутые уровни мощности разных электронных приборов.

В настоящее время все больше внимание уделяется освоению гиротронами терагерцового диапазона частот (0,1-10 ТГц) [14-20]. В зависимости от уровня выходной мощности можно условно разделить гироприборы на три группы: малой мощности – 10-1000 Вт, средней мощности –

1-100 кВт, большой мощности – выше 100 кВт. Для этих групп, отличающихся кругом своих приложений, основные проблемы имеют собственную специфику и свой набор технических решений. Мощное терагерцовое излучение может быть использовано для создания плотной плазмы и управпараметрами (управляемый термоядерный ления eë синтез [7-10, 14, 20, 21], реализации «точечных» плазменных источников рентгеновского излучения [19], дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения) [11]. Для гироприборов средней мощности основным являются технологические приложения, создание и обработка новых полупроводниковых керамических и композитных материалов [5-7, 9, 20, 21]. Терагерцовые гиротроны малой мощности перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, включая развитие методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения, а также медико-биологических приложений [17-24].



Рисунок 2.2. Достигнутые уровни мощности электронных приборов

Для дальнейшего продвижения гиротронов в терагерцовую область частот имеются только две возможности: повышение магнитного поля (как мы указывали выше, возможности тут довольно ограничены) и работа гиротронов на гармониках гирочастоты (см. (2.1)). Последние разработки высокочастотных гиротронов, связанные одновременно с использованием высоких гармоник и высоких значений поля сверхпроводящего магнита, стремятся к преодолению рубежа 1 ТГц при работе гиротронов как в короткоимпульсном, так и в непрерывном режиме. Выходные мощности, как правило, от 10 Вт до нескольких киловатт. Такие величины выходной мощности не столь высоки, как в гиротронах для УТС, которые, как указывалось выше, работают в диапазоне мощностей до нескольких МВт в миллиметровой области длин волн. Тем не менее указанная выходная мощность (от 10 Вт до нескольких кВт) – по-прежнему крайне высокий уровень мощности по сравнению с другими источниками терагерцового излучения и вакуумных и полупроводниковых приборов.

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.

Наш обзор современных работ по гиротронам в ТГц-диапазоне состоит из нескольких частей. Сначала мы опишем современное состояние магнитных систем, прогресс в разработке гиротронов большой средней и малой мощности с криомагнитами, а затем гиротронов с импульсными соленоидами. Затем будут описаны некоторые новые варианты гироприборов, перспективных для освоения терагерцового диапазона, а также некоторые приложения терагерцовых гиротронов.

2.2. Магнитные системы

Сильные магнитные поля, необходимые для работы непрерывных и длинноимпульсных гиротронов (а также для импульсных гиротронов с высокойчастотой повторения) терагерцового диапазона, создаются сверхпроводящими соленоидами. Не будет преувеличением сказать, что развитие магнитных систем – ключ к развитию гиротронов и их приложений. В гиротроне взаимодействие электронного пучка с одной из собственных мод круглого волновода происходит практически на частоте отсечки [3-7]. При этом величина индукции ведущего магнитного поля B_0 , требуемого для генерации излучения с частотой f_0 , определяется условием циклотронного резонанса:

$$B_0[\mathrm{T}\pi] \approx 35.7 \frac{\gamma}{n} f[\mathrm{T}\Gamma\mathrm{I}\mathrm{I}], \qquad (2.3)$$

где $\gamma = 1 + \frac{U[\kappa B]}{511}$ – релятивистский фактор, *n* – номер циклотронной гармоники, на которой происходит взаимодействие.

Долгое время практически единственными типами магнитных систем для гироприборов были криомагниты на основе катушек, изготовленных из ниобий-титанового кабеля (реже с добавлениями ниобийоловянного кабеля) и погруженных в жидкий гелий для обеспечения тре-

буемой рабочей температуры. К недостаткам указанных систем следует отнести необходимость затратной по времени и стоимости процедуры регулярного подлива в криостат дорогостоящих криогенных жидкостей (гелия и азота). В настоящее время все более широкое распространение получают криомагнитные системы, имеющие встроенный охладитель и не требующие использования криогенных жидкостей, - «сухие» криомагниты. Такие магнитные системы промышленно изготавливаются многими зарубежными фирмами, например Джастек (Japan Superconducting Technology (JASTEC), Япония), Сумитомо (Sumitomo, Япония), Криомагнетикс (Cryomagnetics, CША), Оксфорд инструментс (Oxford Instruments, Англия) и другими. В России промышленное производство «сухих» магнитов, отвечающих требованиям работы с гиротронами мегаваттного уровня, пока не налажено, все работы в данном направлении носят экспериментальный характер. Однако следует отметить появление в 2015 году отечественного варианта сухого криомагнита с полем до 10 Тл и проходным отверстием 80 мм. Этот магнит, успешно разработанный и изготовленный Криомагнитной лабораторией ФИАН совместно с ООО «РТИ, Криомагнитные системы», соответствует современному мировому уровню. Это позволяет надеяться на относительно успешное развитие этого научно-технического направления в России в ближайшем будущем.

На рис. 2.3 а приведены фотографии криомагнитов фирмы Джастек (Japan Superconducting Technology (JASTEC), Япония) с полем 7 Тл и диаметром проходного отверстия 240 мм и 15 Тл – 52 мм. Современные гиротроны большой мощности вставляются в проходное («теплое») отверстие криомагнита катодной частью, и таким образом диаметр этого отверстия ограничивает максимальный размер катода и, вообще, электроннооптической системы. Таким образом, максимальные магнитные поля и диаметр проходного отверстия определяют предельные значения частоты и мощности гиротронов. В настоящее время для криомагнитов с полем 7 Тл для отечественных гиротронов с частотой 170 ГГц и мощностью 1 МВт типичные значения проходного отверстия 160 мм. Типичные значения потребляемой мощности криомагнитов 7-10 кВт не оказывает существенного влияния на эффективность гиротронных комплексов большой мощности, однако для комплексов средней и малой мощности это может оказаться существенным. Для «сухих» криомагнитов с максимальным реализованным полем 13-15 Тл проходное отверстие не превышает 110 мм, что ограничивает частоту на уровне 350-420 ГГц при работе гиротрона на первой гармонике, и мощность, оценочно, на уровне около 300 кВт. Для широкого круга приложений представляет большой интерес развитие сухих криомагнитов на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). На рис. 2.3 б приведена фотография ВТСП магнита фирмы «Криомагнетикс», (США) с рабочим полем 3.35 Тл при рабочей температуре 35 К. Максимальнодостижимые значения поля в ближайшие годы выходит за рамки этой статьи, но стоит отметить возможности, предоставляемые быстрым прогрессом в высокотемпературных сверхпроводниках. Эти материалы, например YBCO (иттрий-бария оксид меди), продемонстрировали значительное повышение критических токов в полях выше 20 Тл [25].



б

Рисунок 2.3. «Сухие» криомагнитные системы

Поля в диапазоне 35-40 Тл в настоящее время реализованы в «гибридных» магнитных системах, состоящих из комбинации соленоида с водяным охлаждением и криомагнита. Такие магниты успешно реализованы, например, в лабораториях сильных магнитных полей Европы и США (Гренобль и Талахасси, соответственно), но эти системы имеют относительно небольшой (порядка 50 мм) размер проходного отверстия, большую длину магнита (около 3 метров) и колоссальное энергопотребление – 20 МВт при полях около 35 Тл [26]. В силу перечисленных причин такие системы не могут рассматриваться в качестве перспективных для разработки гироприборов, за исключением совсем экзотических вариантов демонстрационного характера.

Определенный оптимизм существует в отношении использования импульсных соленоидов для тех задач, в которых допустим импульсный режим генерации. В конце первого десятилетия XXI века практически одновременно лабораториями Дрездена и Лос-Аламоса были достигнуты рекордные значения импульсного магнитного поля – 97 Тл [27]. Относитель-

но компактные соленоиды с азотным охлаждением, позволяющие достигать полей до 50 Тл в объеме, достаточном для размещения электродинамической системы высокочастотных гиротроновпри частоте следования импульсов 1 раз в несколько минут, созданы в ИПФ РАН.

2.3. Гиротроны с криомагнитами

2.3.1. Гиротроны большой мощности

Наиболее яркие представители гироприборов большой мощности – **гиротроны** для **УТС** работают в условиях основного гирорезонанса (n = 1). Типичные образцы таких гиротронов представлены на фотографиях на рис. 2.4. Главные проблемы, которые необходимо решить при разработке гиротронов для УТС [5-10, 20, 21, 28-37], таковы:

• формирование интенсивных винтовых электронных пучков (ВЭП) с достаточно большой осцилляторной энергией и приемлемым скоростным разбросом;

• обеспечение стабильной и высокоэффективной генерации рабочей моды в сверхразмерных резонаторах с приемлемым уровнем тепловой нагрузки;

• обеспечение эффективного вывода излучения из гиротрона, как правило, с преобразованием сложной рабочей моды в волновой пучок, с оптимизацией его пространственного распределения;

• разработка надежного коллектора электронного пучка;

• создание выходного окна, способного передать высокочастотное излучение из гиротрона.

Достижение в гиротронах мегаваттного уровня мощности подразумевает работу основных подсистем гиротрона – электронной пушки, резонатора, узла вывода излучения, коллектора – в режиме экстремальных тепловых нагрузок. Полный КПД гиротрона и его предельная мощность определяются эффективностью и предельными возможностями его подсистем: электронно-оптической системы, резонатора, системы преобразования и вывода излучения, коллектора (в.т.ч. и с рекуперацией). На рис. 2.4 показаны фотографии современных образцов гиротронов мегаваттного уровня мощности для УТС. Все эти гиротроны работают на высоких пространственно-развитых модах $TE_{m,p}$ (m >> 1, p >> 1).

В мощных гиротронах для плазменных приложений на частотах до 0.17 ТГц реализованы непрерывные (порядка 1000 с) высокоэффективные (КПД более 50%) режимы мегаватного уровня мощности, в том числе и со ступенчатой перестройкой частоты в широких пределах, а также модуляцией выходной мощности. Конструкция мощного гиротрона обычно включает встроенный квазиоптический преобразователь и коллектор электронов с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка (так называе-

мый CPD-коллектор), окно вывода излучения выполнено, как правило, из синтетического алмаза [8-10]. Продолжаются разработки гиротронов с мощностью до 2 МВт и более.



Рисунок 2.4. Гиротроны для УТС мегаваттного уровня мощности

Потребности УТС установок следующего поколения диктуют необходимость повышения рабочей частоты гиротронов при повышении или хотя ба сохранении выходной мощности. Прогресс в разработке магнитных систем создает предпосылки для таких разработок. Чтобы оценить основные возможности повышения рабочей частоты и мощности, можно воспользоваться приближенной формулой [36], связывающей достижимый КПД, питч фактор *g*, длину волны, плотность омических потерь, выходную мощность, ускоряющее напряжение и соответствующие рабочей моде азимутальный индекс и корень производной функции Бесселя:

$$\eta \approx \frac{0.26 \cdot g^{3/2} \cdot v_s^{5/4} \cdot (\lambda^{5/2} P_{ohm})^{3/4}}{(1+g^2)^{1/2} \cdot m^{1/4} \cdot U_0^{1/2} \cdot P^{1/2}}.$$
(1.4)

Из рассмотрения этой зависимости следует, что повышение рабочей частоты при прочих равных условиях требует использовать все более высокие рабочие моды в сверхразмерных резонаторах. Для уточненного исследования характеристик гиротронов используется развитый метод численного моделирования. Например, для 0.3 ТГц гиротрона с рабочей модой $TE_{44,33}$ на рис. 2.5 приведены расчетные зависимости выходной мощности и омических нагрузок от тока пучка и выходной мощности и КПД от скоростного разброса. Численное моделирование системы проводилось для разных протяженностей регулярной части резонатора (8-10 мм) в рам-

ках самосогласованной модели гиротрона и реалистичных предположений о свойсвах электронного пучка [37] Согласно расчетам, КПД этого гироет около 30% без рекуперации и

300GHz/0.2-1MW/CW Gyrotron



Рисунок 2.5. Зависимости выходной мощности и омических нагрузок (*a*) от тока пучка и выходной мощности и (*б*) КПД от скоростного разброса

Мощные терагерцовые гиротроны интенсивно разрабатываются в Японии, ЕС, и США. Так, в ЈАЕА (Япония) недавно был разработан гиротрон с частотой 0,3 ТГц [39], имеющий аксиальный вывод мощности на рабочей моде $TE_{32,18}$ (т.е. типа рис. 2.5 *a*), с использованием 13 Т сухого криомагнита с проходным отверстием 110 мм. В экспериментах, недавно проведенных с этим гиротроном, достигнута выходная мощность 520 кВт с КПД около 20% при ускоряющем напряжении 80 кВ и токе пучка 33,8 А, при длительности импульса 1 мс. Подобный гиротрон на рабочей моде $TE_{22,2}$ (с более скромным комплексом параметров) с использованием 12 Т сухого криомагнита с проходным отверстием 100 мм разрабатывается в университете г. Фукуи для диагностики плазмы в стеллараторе LHD (NIFS, Япония) [40]. На частоте 303 ГГц при токе пучка 15 А и ускоряющем напряжении 60 кВ была достигнута выходная мощность более 200 кВт. Аналогичные проекты развиваются в КІТ(Германия) и в нашей стране [38, 41].

Программы работ, заявленные ведущими разработчиками и заказчиками гиротронов, демонстрируют устойчивую тенденцию к дальнейшему наращиванию рабочих частот и мощности гиротронов [9, 10, 20].

2.3.2. Гиротроны средней мощности

Основным назначением гиротронов средней мощности является **микроволновая обработка материалов** в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн (до появления гиротронов такого понятия практически не было) и создание пучков многозарядных ионов. С помощью излучения гиротронов происходит стимулирование высокотемпературных процессов – достигаются температуры, достаточно большие для термически активированного диффузионного массопереноса. Отличительными особенностями обработки этого диапазона являются: сильное поглощение электромагнитных волн в большинстве неметаллических материалов, представляющих интерес для высокопроизводительных приложений; даже материалы обычно рассматривается как «прозрачные»; для микроволновых печей (чистый Al_2O_3 , BN, Si_3N_4) могут быть успешно нагреваемы, гораздо выше равномерность распределения электромагнитного поля достигается в аппликаторах с $L >> \lambda$, проблема разбегания тепла становится менее острой, высокая интенсивность поля волновых пучков может быть легко реализована фокусировкой миллиметрового излучения на площади порядка λ^2 . Это делает возможным использование таких пучков волн для местного «лечения» поверхностных дефектов материалов. Аналогичные методы уже используются сегодня (инфракрасный лазер, применение электронных пучков, плазменных потоков и т.д.).

Обычно для технологических приложений используются частоты 24-80 ГГц с использованием теплых магнитных систем или криомагнитов [42-47], однако существовала потребность исследовать специфику использования более высоких частот. С этой целью в 2007 г. ИПФ РАН и НПП «Гиком» для Центра Исследований Дальнего Инфракрасного Диапазона, университета г. Фукуи, Япония [48] был создан непрерывный гиротрон, работающий на частоте 0.3 ТГц на первой циклотронной гармонике. Этот гиротрон с триодной магнетронно-инжекторной пушкой и встроенным квазиоптическим преобразователем работал в «сухом» криомагните японской фирмы Сумитомо Хеви Индастриз (SHI) с максимальным полем 12 Тл и проходным отверстием 100 мм. В составе технологического комплекса гиротрон был активно использован для исследования новых материалов, биологических и медицинских приложений. На рис. 2.6 приведены фотография гиротронного комплекса и выходные характеристики гиротрона. Максимальная мощность 2,7 кВт на частоте 300 ГГц была получена при напряжении пучка 15 кВ и токе 1 А. Подробные измерения с помощью инфракрасной камеры показали два операционных режима с различным распределением мощности СВЧ в окне вывода: в одномодовых режимах с гауссовым волновым пучком при оптимальном магнитном поле в резонаторе и многомодового режима с двумя максимумами интенсивности в неоптимальных областях [49]. Вероятной причиной последнего режима может являться небольшой перекос осей гиротрона и соленоида.

Многолетний опыт работы в разных диапазонах показал, что для широкого распространения гиротронов средней мощности ориентированных на технологические приложения, необходимы автоматизация работы (системы управления, блокировок и защит) и повышение эффективности гиротронного комплекса, снижение их стоимости и возможность перестройки частоты.



Рисунок 2.6. Фотография гиротронного комплекса и выходные характеристики гиротрона

2.3.3. Гиротроны малой мощности

Первые эксперименты по генерации ТГц излучения были проведены сотрудниками НИРФИ (через некоторое время данные исследования перешли во вновь созданный Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород) в 70-80-х годах прошлого века – были созданы разборные непрерывный гиротрон с частотой 0,31 ТГц и рекордной для того времени мощностью 1,6 кВт [50] и непрерывный гиротрон с рабочими частотами 0,25 ТГц и 0,28 ТГц [51]. После первых успехов интенсивность работ по данному направлению снизилась, поскольку на первый план выдвинулась задача создания мегаваттных гиротронов 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 спектроскопии высокого разрешения. В настоящее время работы по созданию терагерцовых гиротронов ведутся в ряде мировых ведущих научных центров, занимающихся вакуумной электроникой. 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 генерации [52], а также созданы непрерывные высокостабильные гиротроны на частотах около 0,26 ТГц [53].

В зарубежных странах данные работы ведутся в основном: в исследовательском центре по изучению дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, г. Фукуи, Япония) [54, 55]; Массачусетском технологическом институте (МІТ, США) [56, 57], Университете Мэриленда (UMD) [58], научноисследовательской компании ССК (*Calabasas* Creek Research, Inc., США) [41], Терагерцовом научном центре (THz RC, Ченду, Китай) [59]. Созданы коммерческие фирмы (например, Bridge 12 [http://www.bridge12.com/], подразделение компании Bruker-Biospin (совместно с СРІ) [60] и др.), основной деятельностью которых является создание гиротронов и гиротронных комплексов для спектроскопии высокого разрешения.

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

Таким образом, оптимизация высокочастотных гиротронов заключается, главным образом, в выборе параметров электродинамической системы и электронного пучка, при которой достигается высокий КПД и осуществляется селекция паразитных мод, особенно 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 орбитой [61]. Разработка гиротронов для спектроскопических приложений ведется в большинстве мировых научных центров, занимающихся гиротронными исследованиями. Это уже упоминавшиеся Maccaчусетский технологический институт (MIT, США), фирма «Бридж-12» (BRIDGE 12), совместные разработки компаний «Брукер-Биоспин» и «Си Пи Ай» (часть бывшей фирмы «Вариан») (BRUKER-CPI), Исследовательский центр дальнего инфракрасного диапазона университета Фукуи (FIRFU, Fukui University), Политехнический институт Лозанны (EPFL LAUSANNE), Институт прикладной физики РАН совместно с НПП «ГИКОМ»(IAP/GYCOM).

Так, в Массачусетском технологическом институте создан целый ряд относительно маломощных (десятки ватт) субтерагерцовых гиротронов, в том числе на гармониках гирочастоты. В гиротроне с частотой генерации 0.46 ТГц удалось получить сравнительно плавную перестройку частоты с шириной полосы 1 ГГц [61].Продемонстрирована возможность стабильной работы в течение 21 дня [62] а также генерация при низких рабочих напряжениях (вплоть по 3.5 кВ) на частоте 0.233 ТГц [63].

Фирмой CPI совместно с компанией BrukerBiospin в США ведутся уже мелкосерийные разработки субтерагерцовых гиротронов. На базе гиротрона с частотой генерации 0.26 ТГц впервые в мире реализован коммерчески доступный вариант ЯМР (NMR) спектрометра высокого разрешения с динамической поляризацией ядер ДПЯ (DNP). [60] Затем аналогичные спектрометры разработаны с ДПЯ системами на 395 и 527 ГГц. Для этих спектрометров компанией BRUKER-CPI разработаны и промышленно выпускаются гиротроны с мощностью около 50 Вт с частотами 263 ГГц, 395 ГГц, и 527 ГГц для соответственно 400, 600 и 800 МГц ЯМР/ДПЯ (NMR/DNP) систем фирмы BRUKER (рис. 2.7). К середине 2014 года были установлены 18 ЯМР спектрометров фирмы BRUKER, оснащенных системами ДПЯ на основе гиротронов: 9 систем для комплексов 400 МГц с гиротронами на 1й гармонике, работающими на частоте 263 ГГц в криомагните с охлаждением жидким гелием; 2 – 400 MHz на 2-й гармонике с той же частотой 263 ГГц, но в «сухом» криомагните без заливки криогенных жидкостей; 2 комплекса – 800 MHz, 2я гармоника, 527 ГГц.

В центре разработки приборов дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, г. Фукуи, Япония) создан ряд непрерывных гиротронов с осевым выводом мощности на рабочей моде, в том числе гиротрон, работающий на частоте 0.89 ТГц в условиях синхронизма с третьей гармоникой циклотронной частоты, и гиротроны на первой и второй гармониках в диапазоне 0.2-0.4 ТГц со встроенным квазиоптическим преобразователем [64]. Эти впечатляющие результаты были получены во многом благодаря применению уникальных криомагнитов с величиной индукции магнитного поля до 20 Тл (см. рис. 2.8). На рис. 2.9 показаны схема и фото $395\Gamma\Gamma\mu/0,1$ кВт/ СW гиротрона (n = 2) в составе комплекса для

спектроскопии (FIR FU, Japan) на базе магнитной системы, не требующей заливки жидким гелием (LHe-free 8T Criomagnet, JASTEC).





Рисунок 2.7. Фотография гиротрона и гиротронных комплексов BRUKER-CPI



Рисунок 2.8. Гиротрон в 20 Тл магните и зависимости частоты генерации от магнитного поля на 1-й и2-й гармониках гирочастоты (FIR FU, Japan)



Рисунок 2.9. Схема и фото 395ГГц/0,1 кВт/СW гиротрона (n=2) в составе комплекса для спектроскопии (FIR FU, Japan)

В Центре изучения физики плазмы (Лозанна, Швейцария) недавно был реализован непрерывный гиротрон с частотой 0.26 ТГц на первой гармонике гирочастоты с «сухим» криомагнитом, максимальная мощность которого составила 200 Вт. Экспериментальные исследования для этого гиротрона были сопоставлены с расчетными данными, включая сложные нестационарные режимы генерации [65], и между ними было обнаружено хорошее соответствие.



Рисунок 2.10. Фото 0.26ТГц/0,2 кВт/СW гиротрона и вспомогательного оборудования

В нашей стране первые успешные эксперименты по генерации субмиллиметрового излучения гиротронами были выполнены в 70-80-х гг. прошлого века [50, 51]. После этих пионерных работ основное внимание исследователей было сосредоточено на создании мощных гиротронов для УТС. Также необходимо отметить отсутствие современных отечественных криомагнитов с высоким уровнем поля, достаточным диаметром теплого проходного отверстия и приемлемым уровнем потребительских характеристик.

В 2009 г. в ИПФ РАН совместно с НПП «Гиком» впервые в России был разработан гиротрон для ДПЯ/ЯМР спектроскопии (рис. 2. 11) на второй гармонике гирочастоты с частотой генерации 0.258 ТГц и мощностью до 200 Вт при стабильности частоты и мощности генерации за 12 часов работы не хуже 3×10^{-6} и 10^{-2} , соответственно [53]. Генерация наблюдалась на модах TE₂₃ с частотой 0.258 ТГц и TE₀₃ с частотой 0.264 ТГц. Частота генерации может в небольших пределах подстраиваться изменением температуры резонатора (около $4M\Gamma \mu/^{0}C$), что было успешно использовано для применения комплекса к задачам ЯМР спектроскопии. Эксперименты с использованием этого генератора в Институте биофизической химии Университета им. И.В. Гете (Франкфурт-на-Майне, Германия) позволили в 80 раз повысить чувствительность и разрешающую способность ЯМР спектрометра [66]. К недостаткам указанного комплекса следует отнести использование заливного криомагнита с периодичностью подливки жидкого гелия раз в несколько дней, недостаточную эффективность квазиоптического внешнего преобразователя и отсутствие автоматизированной системы управления, что снижало его потребительскую привлекательность.



Рисунок 2.11. Фото 0.26 ТГц/0,2 кВт/СW гиротрона (n=2) в составе комплекса для спектроскопии (а) и зависимость выходной мощности от тока пучка (б)

С целью устранения отмеченных недостатков и дальнейшего усовершенствования подобного рода систем была выполнена разработка но-

вого гиротронного комплекса, ориентированного на не требующий заливки жидким гелием («сухой») криомагнит JMTD 10T100 фирмы JASTEC (Япония), с максимально уровнем индукции поля 10 Тл и проходным отверстием 100 мм [67-69]. Была выполнена оптимизация узлов, проектирование и изготовление гиротронас частотой 0.263 ТГц, работающего на первой гармонике гирочастоты для автоматизированного комплекса. Ниже на рис. 2.12 приведен общий вид этого гиротронного комплекса, фото системы управления, и зависимость выходной мощности от магнитного поля. Выходная мощность на рабочей моде ТЕ₅₃, преобразованной внутри лампы в гауссов пучок, достигала уровня 1 кВт (при КПД=17%), что более чем достаточно для всех планируемых приложений этого комплекса. Содержание гауссовой компоненты в выходном излучении гиротрона составило 93% [69]. Частота генерации может в небольших пределах подстраиваться изменением магнитного поля, ускоряющего напряжения и температуры резонатора, что было успешно использовано для применения комплекса к задачам спектроскопии [56]. В этом же гиротроне при другом значении магнитного поля была зарегистрирована генерация с частотой 502 ГГц с выходной мощностью 10 Вт, соответствующая рабочей моде ТЕ_{10.5}, синхронной второй гармонике гирочастоты (см. рис. 2.12 в) [67].





Рисунок 2.12. Фото 0.26 ТГц/1 кВт/СW гиротрона (n=1) в составе комплекса для спектроскопии (ИПФ РАН-НПП «ГИКОМ») (*a*), диалоговое окно автоматизированной системы управления комплексом (б) и зависимость выходной мощности от магнитного поля (*в*)

Оригинальная идея по радикальному упрощению гиротронного комплекса была независимо предложена российскими и американскими разработчиками [70, 71].

Суть ее состоит в использовании магнитной системы ЯМР спектрометра одновременно в качестве магнита для гиротрона (см. рис. 2.13).



Рисунок 2.13. Профиль магнитного поля ЯМР спектрометра, принципиальная схема «гиротрино» (источник микроволнового излучения линия передачи и образец в составе комплекса для спектроскопии)

Эта разновидность гиротрона названа «гиротрино». При таком конструктивном решении весь комплекс становится очень компактным, упрощается линия передачи и соответствующие потери. Разумеется, оптимизация таких совмещенных систем сложнее, чем раздельных, поскольку существенно ограничивается число степеней свободы. Эти системы находятся только в самом начале своего развития, и проблемы, с которыми встретятся их разработчики, еще не до конца выяснены.

2.4. Гиротроны с импульсными магнитными полями

В настоящее время диапазон терагерцовых частот может быть достигнут гиротронами на основной гармонике (что позволяет радикально упростить проблему селекции рабочего типа колебаний) только с помощью импульсных магнитов.

Опыт экспериментов с гиротронами, работающими в импульсных магнитных полях [52, 72], показал, что при разработке гиротронов с импульсными соленоидами должен учитываться целый рад специфических требований:

а) форма импульсного соленоида, как и соленоидов постоянного тока, должна обеспечивать осевую однородность магнитного поля в области резонатора (т.е. на участке в 5-7 длин волн) с точностью до 0,5%. При этом поля рассеяния должны убывать достаточно плавно, чтобы не ухудшить качество формируемого электронного пучка;

б) для того, чтобы расстройка циклотронного резонанса сохранялась близкой к оптимальной по КПД как в течение одного импульса, так и от импульса к импульсу, временной уход магнитного поля (т.е. неоднородность вершины импульса) в течение высоковольтного импульса должен быть в пределах +0,1% и повторяемость амплитуды магнитного поля от импульса к импульсу также должна быть в пределах +0,1%. Последнее обстоятельство следует учитывать при стабилизации как зарядного устройства накопителя энергии, используемого для создания импульсного магнитного поля, так и параметров импульсного соленоида (главным образом, его активного сопротивления, изменение которого меняет ток через соленоид и, следовательно, амплитуду магнитного поля);

в) корпус гиротрона должен быть достаточно прочным, чтобы выдерживать большие механические нагрузки, обусловленные импульсным характером магнитного поля, и в то же время достаточно тонким, чтобы по возможности ослабить нагрев лампы индукционными токами, а также уменьшить затухание в корпусе лампы импульсного магнитного поля, приводящее к искажению его силовых линий, следствием чего могут быть прожиг электронным пучком входного сужения резонатора, смещение зоны токооседания в области коллектора и т.п.;

г) проводимость резонатора, с одной стороны, должна быть достаточно низкой, чтобы уменьшить *экранирование* переменного магнитного поля [73], т.е. ослабление напряженности магнитного поля по мере его проникновения в глубь проводящей среды за счет возникновения вихревых токов. По этой же причине резонатор, разумеется, должен быть тонкостенным. С другой стороны, во избежание падения КПД гиротрона эта проводимость должна быть достаточно высока, чтобы омическая добротность резонатора существенно превосходила его дифракционную добротность. Удовлетворить этим противоречивым требованиям удается, например, путем создания резонатора из нержавеющей стали с омедненной внутренней поверхностью или из сплавов на основе бронзы;

д) для стабильной работы гиротрона в режиме периодического следования импульсов как сам соленоид, так и корпус гиротрона должны достаточно интенсивно охлаждаться.

Основным отличием импульсных гиротронов от гиротронов, работающих в постоянном магнитном поле, является экранирование переменного магнитного поля металлическими элементами лампы. В принципе этот же эффект также может иметь место на металлической поверхности катода (что уменьшает угол наклона силовых линий магнитного поля к катодной поверхности), однако при обычных для термоэмиссионных катодов гиротронов температурах проводимость материала катода настолько низка, что магнитное поле с длительностью импульса свыше 1 мс проникает в эмиттирующий слой катода на глубину порядка 1 мм практически без изменений.

По мере укорочения рабочей длины волны гиротрона уменьшается плотность электронного тока пучка, приходящаяся на элементарную ячейку взаимодействия и одновременно растет доля омических потерь в стенках резонатора. Величины омической и дифракционной добротностей приближаются друг к другу, при этом выходной КПД может оказаться существенно меньше электронного. В связи с этим значения оптимальных по КПД безразмерных параметров – длины резонатора и расстройки циклотронного резонанса – оказываются заметно отличными от принятых для гиротронов миллиметрового и более длинноволновых диапазонов. Данное обстоятельство приходится учитывать при разработке гиротронов субмиллиметрового диапазона.

Первые успешные эксперименты с гиротронами на базе импульсных соленоидов были выполнены в ИПФ ран под руководством Г.С. Нусиновича, А.Г. Лучинина и М.М. Офицерова в 80-х годах прошлого века. На основном циклотронном резонансе в этих экспериментах были достигнуты частоты до 0.65 ТГц при мощности генерации до 40 кВт и эффективности в несколько процентов. В 2006-2007 годах во многом благодаря сотрудничеству между ИПФ РАН и FIR FU гиротронами был преодолен рубеж в 1 ТГц. Японский вариант соленоида использовал оригинальную систему охлаждения жидким азотом, в которой дополнительная прочность конструкции обеспечивалась замерзанием влажного порошка, заполняющего корпус соленоида. Сам соленоид реализовывался по классической схеме с проходным отверстием, что в итоге привело к значительной энергетике (300 кДж) и крайне низкой частоте следования импульсов 1 импульс в 20 минут. Тем не менее в этих экспериментах на второй гармонике гирочастоты (n=2) была продемонстрирована мощность в десятки ватт при длительности импульса излучения до 1 мс. Практически одновременно в ИПФ РАН был создан гиротрон на базе импульсного магнита (рис. 2.14), обладающий рядом конструктивных особенностей:

 – с целью достижения максимальной энергетической эффективности (уменьшения объема магнитного поля) токопроводящая жила соленоида намотывалась непосредственно на корпус гиротрона;

 – с целью повышения механической прочности конструкции намотка осуществлялась композитным кабелем; центральная жила из сплава Nb-60% Ті механически армирует наружную медную оболочку кабеля;

– для уменьшения омических потерь, увеличения механической прочности и термостабилизации в качестве пассивного хладогента используется жидкий азот. Использование жидкого азота позволило снизить омическое сопротивление соленоида в 7 раз по сравнению со значением, измеренным при комнатной температуре; – размеры соленоида, имеющего прямоугольное сечение, подбирались таким образом, чтобы реализовать оптимизированное продольное распределение магнитного поля, рассчитанное численными методами.

Соленоид запитывался от специально разработанного источника питания, накопителем энергии в котором являлась батарея конденсаторов с энергией до 5.6 кДж (максимальное напряжение до 3.5 кВ, максимальный ток до 6 кА). Схема стабилизации обеспечивала повторяемость амплитуды магнитного поля с точностью 0.05%, что позволяло поддерживать гиротрон, работающий в режиме разовых импульсов, в оптимальных по КПД условиях на протяжении многих импульсов. В процессе испытаний соленоид выдержал несколько тысяч импульсов, что не отразилось на его характеристиках. Частота импульсов излучения ограничивалась временем, необходимым для охлаждения соленоида до азотной температуры и составляла 1 «выстрел» в минуту. Терагерцовое излучение регистрировалось с помощью точечного диода и калориметрической нагрузки, имеющей чувствительность около 10 мДж в одном импульсе. При изменении магнитного поля (тока соленоида), наблюдалось возбуждение последовательности мод с частотами, близкими к 1 ТГц и уровнем мощности до 5 кВт. Для магнитного поля, 38,5 Тл и электронного пучка, имеющего параметры 24 кВ и 3 А, мода ТЕ₁₇₄ возбуждалась на частоте 1,022 ТГц с энергией излучения 100 мДж, при длительности импульса 20 мкс (рис. 2.14) [52].



Рисунок 2.14. Гиротрон для работы в импульсном магнитном поле и осциллограммы тока соленоида и высоковольтного импульса (вверху справа); тока (CH3) и напряжения (CH1) электронного пучка, тока соленоида (CH2) и сигнала с CBЧ детектора мощности (внизу справа)

Относительно низкая эффективность генерации (2-3%) обусловлена, в основном, большой длинойрезонатора, которая была выбрана два раза

больше, чем оптимальная, для надежного возбуждения рабочеймоды. Для измерения частоты в одиночных импульсах была использована гетеродинная схема со смешиванием сигналов от гиротрона и опорного генератора. Измеренная частота (1.022 ТГц) была близка к частоте циклотронного резонанса(1.024 ТГц), рассчитанной по величине магнитного поля. В дальнейшем, при повышении тока соленоида, в этом же приборе удалось достичь рекордного на сегодняшний день значения частоты генерации гиротрона 1.3 ТГц при мощности 1.5 кВт [74].



Рисунок 2.15. Мощный гиротрон с импульсным соленоидом, экспериментальный стенд в университете Мэриленда, осциллограммы тока (СН2) и напряжения (СН1) электронного пучка, и сигнала с СВЧ детектора мощности (СН3)

Продолжением работ с импульсным соленоидом явилось создание мощного гиротрона, предназначенного для инициации точечного газового разряда (рис. 2.15). Реализованный на известной и хорошо себя зарекомендовавшей в экспериментах с гиротронами для термоядерных приложений рабочей моде $TE_{31.8}$ гиротрон позволил получить до 200 кВт мощности в разовом импульсе длительностью 20-30 мкс на частоте 0.7 ТГц [12, 75].

Вопрос о возможности повышения частоты следования импульсов в подобных системах остается открытым. Теоретический анализ, представленный в работе [76], показывает принципиальную возможность достижения частоты следования импульсов до 2 Гц при полях около 40 Тл, для чего предлагается конструкция с улучшенным теплоотводом от соленоида за счет пространственно развитых ребер и намотки соленоида фольгированным проводником (рис. 2.16). К сожалению, приходится констатировать, что первые эксперименты по реализации этой конструкции завершились разрушением соленоида при полях, составлявших примерно половину от номинального значения. Тем не менее продолжаются работы по созданию соленоидов с прокачкой хладагента между обмотками, что в перспективе сохраняет надежду на повышение частоты следования импульсов.



Рисунок 2.16. Проект компактного гиротрона с импульсным соленоидом и теоретический расчет температуры соленоида от импульса к импульсу (на основании данных работы [76])

В заключение отметим интересную особенность гиротронов с импульсными соленоидами, представляющую несомненный практический интерес. Как отмечено выше, при изменении магнитного поля происходит возбуждение последовательности близких по собственным числам мод в достаточно широкой (10-15 процентов) полосе частот. За счет этого можно достаточно просто изменять частоту генерации от импульса к импульсу, изменяя напряжение накопителя энергии либо время задержки высоковольтного импульса на катоде гиротрона относительно импульса тока соленоида (и, соответственно, ток соленоида в момент подачи импульса высокого напряжения). Кроме того, можно подавать высоковольтный импульс не на вершине, а на фронте импульса тока соленоида, получая в результате генерацию серии коротких импульсов с различными частотами.

2.5. Гиротроны на высоких гармониках

Для реализации условия циклотронного резонанса в ТГц диапазоне частот гиротроны должны работать либо при наличии очень сильных магнитных полей, либо на гармониках циклотронной частоты электронов. Однако работа на высших гармониках в канонических гиротронах практически невозможна по причине конкуренции с низшими гармониками, если не применять эффективных методов модовой селекции. Электродинамические методы селекции, основанные на использовании резонаторов сложного профиля, в частности связанных резонаторов с трансформацией мод (СРТМ) [77, 78], в которых селекция основана на возбуждении связки мод на одной частоте, с одинаковым азимутальным и близкими радиальными индексами, представляются труднореализуемыми в силу требования микронных точностей при изготовлении цилиндрических резонаторов радиусом 1.5-2 мм и длиной в несколько (в отдельных случаях до десятка) миллиметров. Еще одним обсуждаемым методом является использование секционированныхэлектронных потоков в одном гироприборе (многолучевые гиротроны) [79, 80]. При этом дополнительный электронный пучок может использоваться как для того чтобы способствовать более эффективному возбуждению рабочей моды – активный дополнительный пучок (тогда доля вращательной энергии электронов в этом пучке достаточно велика и составляет примерно 0.6-0.7 от полной энергии), либо дополнительный пучок поглощает энергию паразитных колебаний (в этом случае на входе в пространство взаимодействия доля вращательной энергии мала). Теоретические оценки, демонстрирующие перспективность указанного подхода в ТГц диапазоне представлены, на рис. 2.17 [81].

Одним из наиболее эффективных методов электронной селекции является использование приосевых винтовых электронных пучков. Основанные на этом принципе приборы получили название гиротронов с большой орбитой (ГБО). Принцип селекции рабочего типа колебаний в этих приборах основан на том, что приосевой (вращающийся по ларморовской орбите вокруг оси аксиальной симметрии прибора) электронный пучок эффективно взаимодействует только с модами, у которых азимутальный индекс равен номеру циклотронной гармоники [82, 83].

Группой В.Л. Братмана в гиротроне с большой орбитой – ГБО (LOG) в ИПФ РАН была получена генерация в ТГц диапазоне частот на второй и третьей гармониках гирочастоты (рис. 2.18). При магнитных полях около 15 Тл и напряжении электронного пучка 80 кВ на второй гармонике получена генерация на частоте 0.6 ТГц при мощности до 2 кВт, а на третьей на частоте 1 ТГц при мощности 0.3 кВт и длительности импульса 10 мкс [83]. В этих экспериментах использовался биттеровский магнит с эффективным водяным охлаждением, что позволило довести частоту следования импульсов до 0.1 Гц.



Рисунок 2.17. Расчетные сценарии установления режима генерации в двухпучковом гиротроне на второй гармонике гирочастоты с рабочей модой TE_{8,5} в присутствии конкуренции с модами TE_{1,4} TE_{6,2} на основном циклотронном резонансе. (Справа – гиротрон с одним электронным пучком, в центре – гиротрон с дополнительным поглощающим пучком и слева – гиротрон с двумя активными пучками)



Рисунок 2.18. Гиротрон с большими орбитами для работы в импульсном магнитном поле и и криомагнит для непрерывного ГБО

Успешная реализация гиротрона с большой орбитой на базе импульсного соленоида и относительно низкое значение магнитного поля послужили основой для старта проекта по созданию ГБО в кроиомагните, что позволяет в перспективе перейти к непрерывному режиму генерации [84]. Основной проблемой на пути широкого распространения ГБО была и остается сложность реализации электронно-оптических систем (ЭОС), формирующих приосевые электронные пучки. Как правило, такие ЭОС требуют магнитной системы с реверсом магнитного поля, что обусловливает необходимость разработки специфических соленоидов, с одной стороны, и требует высокой точности продольной юстировки лампы в магнитном поле – с другой.

Тем не менее имеются все основания для оптимизма поскольку известен ряд успешных реализаций подобных систем, из которых, кроме уже упомянутого ГБО терагерцового диапазона, хотелось бы выделить ГБО в постоянном магните (рис. 2.19), продемонстрировавший возможность селективного возбуждения серии мод вплоть до 5 гармоники включительно [85]. На 5-й циклотронной гармонике получена частота *около* 0.15 ТГц, и хотя эксперимент проводился в импульсном режиме, конструкция гиротрона (при наличии соответствующих источников питания) позволяла реализовать непрерывный режим работы.



Рисунок 2.19. Гиротрон с большими орбитами в постоянном магните, осциллограммы сигнала с диода (мощности генерации), тока и напряжения электронного пучка, экспериментальное распределение мощности на выходе гиротрона при работе на 5-й гармонике гирочастоты

Прежде чем перейти к краткому рассмотрению приложений, для которых требуются описанные выше источники излучения, необходимо отметить, что наряду с разработкой генераторов ведутся работы по созданию гироусилителей терагерцового диапазона. В силу большей сложности таких систем пока исследования сосредоточены в области частот, не превышающих 0.26 ТГц. Тем не менее на сегодня известны, по крайней мере, два проекта усилителей – проект группы Г.Г. Денисова и С.В. Самсонова в ИПФ РАН, основанный на использовании электродинамической системы с винтовой многозаходной гофрировкой поверхности [87, 88], и проект, реализуемый в МІТ группой профессора Р. Темкина, основанный на использовании сложной электродинамической системы, состоящей из набора стержней (так называемая «photonic band gap structure» – рис. 2.20). В последнем случае экспериментально достигнуто усиление 38 Дб на частоте 0.25 ТГц при пиковой мощности 45 Вт [89].



Рисунок 2.20. Схематичное изображение электродинамической системы, испытательный стенд и первые экспериментальные результаты, полученные в экспериментах с гироусилителями [89]

2.6. Некоторые приложения ТГц гиротронов

Оставляя за рамками хорошо известные «классические» области применения гиротронов, такие как нагрев плазмы и управление током в установках УТС и применение гиротронов для микроволновых технологий, попробуем дать краткий анализ новых приложений, возникших благодаря появлению гиротронов ТГц диапазона и, соответственно, простимулировавших их развитие.

Наиболее интенсивно в настоящее время развиваются спектроскопические приложения, особенно ЯМР/ДПЯ спектроскопия высокого разрешения (см., например, обзор [14]). Наличие достаточно интенсивного микроволнового излучения позволяет на один два порядка увеличить соотношение сигнал-шум и, соответственно, существенно снизить время, необходимое для накопления информации. Так, в докладе профессора Р. Гриффина [90] представлена впечатляющая оценка такого снижения – с 4,25 лет до 1 дня. В настоящее время существует стандартный набор опорных спектроскопических частот, кратный ЯМР частотам (200 МГц, 400 МГц ... 1200 МГц), соответствующих им магнитных полей (от 9.4 Тл до 23.5 Тл) и требуемых частот генерации источников излучения (от 0.26 ТГц до 0.79 ТГц). Указанное обстоятельство и обусловливает выбор частот разработчиками непрерывных гиротронов ТГц диапазона.

Следующим интересным приложением является использование ТГц излучения для медико-биологических задач. В ряде публикаций описано отличие в поглощающей способности здоровых и больных (раковых) клеток [91], обусловленное, скорее всего, различием в содержании жидкости, достигающее 3-5 раз в диапазоне частот 0.3-0.5 ТГц. Тем самым открывается возможность селективного воздействия на раковые клетки. Даже если отвергнуть возможность такого селективного воздействия, остается возможность локального (в силу малости длины волны излучения и итоговой апертуры засветки) воздействия на пораженные области. Примеры такой терагерцовой терапии приведены, например, в работах [92]. На рис. 2.21 представлена временная эволюция размера раковой опухоли у облученных излучением гиротрона с частотой 0.2 ТГц крыс по сравнению с контрольной группой.



Рисунок 2.21. Различие в размере раковой опухоли у контрольной и облученной групп [91]

Легко видеть, что по прошествии двух недель размер опухоли у контрольной группы неуклонно увеличивался, тогда как у облученных крыс по истечении того же времени размер опухоли стремился к нулю. Еще одной биологической задачей представляется локализованное воздействие на биологические ткани, расположенные относительно неглубоко (на размерах, сопоставимых с глубиной скин-слоя) под кожей человека. В работе [92] описано воздействие маломощного излучения с частотами 0.2-0.4 ТГц, стимулирующее регенерацию волосяного покрова человека. Естественно, указанная гипотеза требует тщательной проверки, но представляется, безусловно, интересной.

Наконец, говоря о длинноимпульсных или непрерывных гиротронах, необходимо упомянуть о диагностике различных сред, в частности получении контрастного изображения в ТГц излучении, ориентированного на обнаружение различного рода веществ и разработку систем досмотра, визуализации скрытых объектов и примесей (рис. 2.22, [93-94]) и т.п. За редким исключением [94], все указанные приложения требуют относительно невысоких уровней мощности – на уровне десятков или максимально сотен ватт.



Рисунок 2.22. Примеры использования гиротронов для распознавания объектов и визуализации процессов в режиме реального времени

Существенно более высокие мощности нужны для диагностики плотной плазмы или инициации локализованных газовых разрядов. На рис. 2.23 приведены оценки соотношения сигнал шум и требуемые (те, которые на сегодняшний день представляются более или менее достижимыми исходя из уже имеющихся результатов) мощности излучения гиротронов для диагностики плазмы в стеллараторе LHD (NIFS, Япония). Легко видеть, что в интересующем плазменное сообщество интервале температур электронов наилучшие результаты могут быть получены при использовании мощных гиротронов с частотами 0.6-0.7 ТГц, которые сегодня реализованы на базе импульсных магнитов.

К сожалению, приходится констатировать, что импульсные магниты пока не обеспечивают достаточной для задач спектроскопии и диагностики стабильности частоты излучения, в связи с чем ведется разработка гиротронов близкого (сотни киловатт) уровня мощности на частотах около 0.3 ТГц в криомагнитах [39, 40].

Мощное импульсное ТГц излучение позволяет создавать высокие напряженности электрического поля в локализованных объемах, что может быть использовано для инициации точечного газового разряда. При естественном ионизационном фоне вероятность нахождения свободного электрона в таком объеме достаточно мала и возникновение разряда маловероятно. Тем самым, развитие разряда при серии импульсов служит индикатором превышения естественного ионизационного фона и может быть использовано для выявления скрытых радиоактивных источников с расстояния в десятки метров. Подобный подход был предложен в работе [95] Г.С. Нусиновичем и В. Гранадштейном и исследован в совместном проекте ИПФ РАН и UMD (США) [96] с использованием мощного импульсного гиротрона на частоте 0.7 ТГц, описанного в этой главе.



Рисунок 2.23. Оценка соотношения сигнал-шум от уровня при различных значениях температуры электронов в плазме для различных гиротронов [96]

Этот же гиротрон успешно использовался в ИПФ РАН для инициации точечного газового разряда в газовой струе в широком диапазоне давлений (рис. 2.24). Впервые реализован интенсивный точечный источник излучения в ультрафиолетовом диапазоне на основе разряда в неоднородмощным ном потоке газа. создаваемого излучением гиротрона (100 кВт/0.67 ТГц). При размере излучающей области менее 1 мм мощность излучения в диапазоне 10-100 нм в полный телесный угол составляет до 10 кВт [97]. Подобный разряд, в перспективе, может быть использован для создания точечного источника экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) в задачах нанолитографии.

Завершая этот краткий обзор, хочется привести еще две иллюстрации, намечающие направление дальнейших исследований, а именно работы по синхронизации большого числа гиротронов и создание относительно мощных, но компактных и надежных усилителей.

На рис. 2.25 представлен проект ракетного двигателя, основанного на расширении нагреваемого микроволновым излучением газа, приведенный в работе [98]. Согласно оценкам, реализация такого проекта требует синхронизации примерно 1000 гиротронов каждый мощностью 1 МВт (т.е. каждый из гиротронов сопоставим с гиротронами разрабатываемыми для ITER).



Рисунок 2.24. Фото разряда в среде аргона при различных давлениях и фото экспериментальной установки на базе импульсного гиротрона [83]

Последний рисунок (рис. 2.26) заимствован из презентации докладов агентства DARPA (США) и демонстрирует интерес к созданию усилителей мощностью 50-100 Вт на частотах близких к 0.23 ТГц для радаров, рабо-

тающих в условиях значительных естественных помех (пыль, смог, туман и т.д.) [100, 101].



Rocket Launch - Artist's Concept, NASA A. Murakami, AIAA, 2012

Рисунок 2.25. Проект, представленный в NASA, по перспективным ракетным двигателям [98] и пример демонстрации работоспособности указанного принципа, выполненный в Японии [99]

DARPA Video Synthetic Aperture Radar (ViSAR)



http://www.darpa.mil/Our_Work/STO/Programs/Video_Synthetic_Aperture_ Radar_%28ViSAR%29.aspx

Рисунок 2.26. Программные цели задачи по созданию усилителя для радара высокого разрешения, работающего в условиях значительных естественных помех [100, 101]

Как было показано в этой главе, подобные мощности на подобных частотах вполне могут быть достигнуты гироусилителями в ближайшем будущем.

Заключение

Для гиротронов малой мощности для спектроскопии крайне востребованы долговременная стабильность работы и перестройка частоты, повышение КПД, но сложность задачи обостряется проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмиллиметровом диапазоне. Несмотря на необходимость сильных магнитных полей для освоения субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот, режимы генерации уже достигнуты в созданных импульсных и CW гироприборах, работающих на первой и второй гармониках циклотронного излучения. В настоящий момент исследуются важные и перспективные направления по созданию приборов на более высоких гармониках циклотронной частоты в ГБО и гироумножителях, а также вопросы реализации плавной перестройки частоты. Исходя из тепловых нагрузок на элементы конструкции в существующих гиротронах мегаваттного уровня мощности на частотах 0.17 ТГц, можно предположить, что близкие тепловые нагрузки (при сохранении существующей сверхразмерности резонаторов, т.е. при использовании похожих рабочих типов колебаний) соответствуют уровням мощности порядка 250-1000 кВт на частотах 0.3 ТГц и 10 кВт на частотах порядка 1 ТГц в непрерывном режиме генерации. Это позволяет утверждать, что возможности совершенствования гироприборов далеко не исчерпаны и относительно компактные гироприборы с выходной мощностью 1-10³ Ватт и частотой 0,3-1,5 ТГц будут доступны в ближайшее время для многочисленных приложений.

Работы по созданию гиротронов ТГц диапазона в ИПФ РАН с 2014 года ведутся при поддержке проектов РНФ 14-12-00887 и 14-29-00192.

Литература

1. Гапонов-Грехов А.В. Мазеры на циклотронном резонансе / А. В. Гапонов-Грехов, М. И. Петелин // Наука и человечество. М: Знание, 1980. С. 283-298.

2. Гапонов А. В., Гольденберг А. Л., Петелин М. И., Юлпатов В. К. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн: А.с. 223931 (СССР). Заявл. 24.03.67, опубл. 25.03.76

3. Трубецков Д. И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков / Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. М.: Физматлит, 2003.

4. Edgcombe C. J. Gyrotron Oscillators – Their Principles and Practice / C. J. Edgcombe // Taylor & Francis, London, 1993.

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

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

7. Kartikeyan M. V. Gyrotrons – High Power Microwave and Millimeter Wave Technology / M. V. Kartikeyan, E. Borie, M. K. A. Thumm. Springer: Berlin, 2004.

8. Денисов Г. Г. Гиротроны мегаваттного уровня мощности для систем электронно-циклотронного нагрева и генерации тока в установках УТС. / Г. Г. Денисов, В. Е. Запевалов, А. Г. Литвак, В. Е. Мясников // Изв. вузов. Радиофизика. – 2003. – № 46. – С. 845-858.

9. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers / M. Thumm. KIT, Karlsruhe, 2012.

10. Litvak A. G. Trends in High-Power Gyrotron. / A. G. Litvak, G. G. Denisov, V. E. Zapevalov [et al.] // Proc. of 8th Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications. Nizhny Novgorod, 2011 - P. 13-14.

11. Глявин М. Ю. Разработка мощного импульсного субтерагерцового гиротрона для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения / М. Ю. Глявин, А. Г. Лучинин, В. Н. Мануилов, М. В. Морозкин [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика - 2011 - №54 - 8-9 - С. 666-675.

12. Glyavin M. Yu. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency / M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, G. S. Nusinovich, J. Rodgers [et al.] // Applied Physics Letters - 2012 - №101 - 15 - P. 153503.

13. Lewis R. A. A review of terahertz sources / R. A. Lewis // Journal of Physics D: Applied Physics - 2014 - №47 - 37 - P. 374001.

14. Booske J. H. Vacuum electronic high power terahertz sources / J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye, C. L. Kory [et al.] // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol - 2011 - №1 - 1 - P. 54-75.

15. Siegel P. H. Thz technology, IEEE trans. / P. H. Siegel // Microwave Theory Techniques - 2009 - №50 - 3 - P. 910–928.

16. Галдецкий А. В. Вакуумные источники терагерцового излучения / А. В. Галдецкий // Материалы XVI международной зимней школы-семинара по радио-физике и электронике сверхвысоких частот. Саратов: ООО «Издательский центр "Наука"», 2015. - С. 4.

17. Nanni E. A. THz Dynamic Nuclear Polarization NMR / E. A. Nanni, A. B. Barnes, R. G. Griffin, R. J. Temkin // IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology - 2011 - №1 - 1 - P. 145-163.

18. Bratman V. Review Of Subterahertz And Terahertz Gyrodevices At IAP RAS and FIR FU. / V. Bratman, M. Glyavin, Y. Kalynov, A. Luchinin [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science - 2009 - №37 - 1 -P. 36-43.

19. Bratman V. L. Gyrotron development for high power THz technologies at IAP RAS. / V. L. Bratman, A. A. Bogdashov, G. G. Denisov, M. Y. Glyavin [et al.] // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves - 2012 - №33 - 7 - P. 715-723.

20. Запевалов В. Е. Эволюция гиротронов / В. Е. Запевалов // Изв. вузов. Радиофизика. - 2011 - №54 - 8-9 - С. 559-572.

21. Thumm M. High power gyro-devices for plasma heating and other applications. / M. Thumm // Int. J. Infrared. Millim. Waves - 2005 - №26 - P. 483–503.

22. Gaponov-Grekhov A. V. Applications of High-Power Microwaves / A. V. Gaponov-Grekhov, V. L. Granatstein. Artech House, Norwood, MA., 1994.

23. Bajaj V. Dynamic nuclear polarization at 9 Tesla using a novel 250 GHz gyrotron microwave source / V. Bajaj, C. Farrar, M. Hornstein [et al.] // J. Magnetic. Res. - 2002 - №160 - P. 85-90.

24. Idehara T. Development of 394.6 GHz CW Gyrotron (Gyrotron FU CW II) for DNP Proton-NMR at 600 MHz / T. Idehara, I. Ogawa, La Agusu [et al.] // Int. J. Infrared and MM Waves - 2007 - №28 - P. 433.

25. Bromberg L. Status of High Temperature Superconducting Fusion Magnet Development / L. Bromberg, H. Hashizume, S. Ito, J. V. Minervini, N. Yanagi // Fusion Sci. Technol - 2011 - №60 - P. 635.

26. http://lncmi-g.grenoble.cnrs.fr/spip.php?rubrique105&lang=en

27. http://www.gizmag.com/100-tesla-pulsed-magnet/21946/

28. Fix A. Sh. The problems of increase in power, efficiency and frequency of gyrotrons for plasma investigations / A. Sh. Fix, V. A. Flyagin, A. L. Goldenberg [et al.] // Int. J. Electronics - 1984 - $N_{0}57 - 6 - P$. 821-826.

29. Zapevalov V. E. Development of 1 MW output power level gyrotron for ITER / V. E. Zapevalov, V. A. Flyagin, G. G. Denisov [et al.] // Plasma Devices and Operation. - 1998 - №6 - P. 111-117.

30. Zapevalov V. E. Development of 170 GHz/1 MW Russian gyrotron for ITER / V. E. Zapevalov, G. G. Denisov, V. A. Flyagin [et al.] // Plasma Engineering and Design. - 2001 - №53 - P. 377-385.

31. Denisov G. G. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion / G. G. Denisov, A. G. Litvak, V. E. Myasnikov [et al.] // Nuclear Fusion - 2008 - №48 - 5 - P. 5.

32. Sakamoto K. Progress of gyrotron development in JAEA / K. Sakamoto, K. Kajiwara, Y. Oda [et. al.] // Proc. of 8th Int, Workshop Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications, Nizhny .Novgorod, 2011 - P. 35-36.

33. Blank M. Megawatt class gyrotron development at CPI / M. Blank, P. Borchard, P. Cahalan [et al.] // Proc. of 8th Int. Workshop Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, 2011 - P. 9.

34. Thumm M. Recent progress on 1 MW, 140 GHz SW series gyrotrons for W-7X / M. Thumm, H. Braune, G. Dammertz [et al.] // Proc. of 8th Int, Workshop Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, 2011 - P. 45-46.

35. Henderson M. Present Status of the 24 MW 170 GHz ITER EC H&CD System / M. Henderson, G. Denisov, A. Litvak [et al.] // Proc. of 8th Int, Workshop Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications, Nizhny .Novgorod, 2011 - P. 21-22.

36. Запевалов В. Е. Гиротрон: пределы роста выходной мощности и КПД / В. Е. Запевалов // Изв. вузов. Радиофизика - 2006 №XLIX - 10 - С. 864-871.

37. Агапов Л. Н. Гиротроны для нагрева плазмы в больших токамаках / Л. Н. Агапов, С. Д. Богданов, С. Н. Власов [и др.] // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. 221-225.

38. Zapevalov V. Numerical Simulation Of Processes At The Cavities Of High-power 300 GHz Gyrotrons / V. Zapevalov, M. Moiseev, N. Zavolsky // The 38th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2013 Mainz on the Rhine, September 1st -6^{th} , 2015 - P. 1-5.

39. Oda Y. Progress Of 300 GHz High Order Mode Gyrotron Development / Y. Oda, T. Kariya, R. Minami, R. Ikeda [et al.] // Conf-XXI\IRMMWTHz-2015\IRMMW, 2015, Proceedings 4 EH1E2, 2015 – P. 3139000.

40. Saito T. Development of a High Power 300 GHz Band Gyrotron for Practical Use in Collective Thomson Scattering Diagnostics in LHDD / T. Saito, J. Kasa, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu [et al.] // Conf-XXI\IRMMWTHz-2015\IRMMW, 2015, Proceedings 4 EH1E2 - P. 3133777.

41. Zapevalov V. E. Preliminary design of 300GHz/200kW/CW gyrotrons for fusion research. / V. E. Zapevalov, A. V. Chirkov, G. G. Denisov, A. N. Kuftin [et al.] // Proc. of 8th

Int, Workshop Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, 2011 - P.143-144.

42. Малыгин О. В. Гиротрон непрерывной мощности 3-5 кВт на фиксированные частоты в диапазоне 33-47 ГГц / О. В. Малыгин, В. Б. Орлов, Л. Ш. Рубинштейн, В. И. Щупак // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. 226-232.

43. Bykov Yu. The gyrotron system for ceramics sintering. Microwaves: Theory and Applications / Yu. Bykov, A. Eremeev, V. Flyagin [et al.] // in Materials Processing III, ed. D. E. Clark, D. C. Folz, S. J. Oda, R. Silberglitt. - Ceramic Transaction, 59 - 1995 - Westerville, Ohio - P.133-140.

44. Kuftin A. N. 5.8-62 GHz CW Gyrotrons With Warm And Permanent Magnets For Technological Applications. / A. N. Kuftin, V. A. Flyagin, V. K. Lygin [et al.] // Proc. of Int. workshop Strong Microwaves in Plasmas, August 2-9. - 1999 - N. Novgorod, 2000. - P. 671-676.

45. Soluyanova E. A. Gyrotron complexes for technological applications / E. A. Soluyanova, Yu. V. Bykov, G. G. Denisov [et al.] // Proc. of 8th Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications, Nizhny .Novgorod, 2011 - P. 133.

46. Kikunaga T. A 28 GHz gyrotron with a permanent magnet system / T. Kikunaga, H. Asano, A. Yasojim [et al.] // Int. J. Electronics - 1995 - №79 - P. 655-663.

47. Bykov Yu. Microwave Source Based on the 24 GHz 3kW Gyrotron With Permanent Magnet / Yu. Bykov, G. Denisov, A. Eremeev [et al.] // The 29th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2004, University of Karlsruhe, Germany, Conference Digest - P. M12.3-191.

48. Запевалов В. Е. Мощный генератор непрерывного электромагнитного излучения частотой 300 ГГц / В. Е. Запевалов, О. В. Малыгин, М. А. Моисеев [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика - 2007 - №50 - 6 - С. 461-470.

49. Saito T. Performance Test Of Cw 300 GHz Gyrotron FU CW I / T. Saito, T. Nakano, H. Hoshizuki, K. Sakai [et al.] // International Journal of Infrared and Millimeter Waves - 2007 - №28 - 12 - P. 1063-1078.

50. Zaytsev N. I. Millimeter- and Submillimeter-Wave Gyrotrons / N. I. Zaytsev, T. B. Pankratova, M. I. Petelin, V. A. Flyagin // Radio Eng. Electron Phys. - 1974 - №19 - P. 103-107.

51. Глявин М. Ю. Возбуждение высших мод в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты / М. Ю. Глявин, А. А. Гуртовник, Г. С. Нусинович, Т. Б. Панкратова // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. 73-83.

52. Glyavin M. Yu. Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field / M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, G. Yu. Golubiatnikov // Phys. Rev. Lett. - 2008 - №100 - P. 015101.

53. Венедиктов Н. П. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамической поляризации ядер / Н. П. Венедиктов, В. В. Дубров, В. Е. Запевалов [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика - 2009 - №53 - 4 - С. 260-268.

54. Idehara T. Development and Applications of High–Frequency Gyrotrons in FIR FU Covering the sub-THz to THz Range / T. Idehara, S. P. Sabchevski // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves - 2012 - №33 - 7 - P. 667.

55. Idehara T. The potential of the gyrotrons for development of the sub-terahertz and the terahertz frequency range–A review of novel and prospective applications / T. Idehara, T. Saito, I. Ogawa [et al.] // Thin Solid Films - 2008 - №517 - 4 - P. 1503.

56. Torrezan A. C. Continuous-Wave Operation of a Frequency-Tunable 460-GHz Second-Harmonic Gyrotron for Enhanced Nuclear Magnetic Resonance / A. C. Torrezan, S.-T. Han, I. Mastovsky [et al.] // IEEE Trans - 2010 - №PS-38 - 6 - P. 1150.

57. Jawla S. Polarizing Agents and Mechanisms for High-Field Dynamic Nuclear Polarization of Frozen Dielectric Solids / S. Jawla, E. Nanni, M. Shapiro [et al.] // IEEE 2011 36th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Houston. 2-7 Oct. 2011. N.Y., 2011.

58. Dumbrajs O. An optimization of sub-THz gyrotron parameters / O. Dumbrajs, G. S. Nusinovich // Phys. Plasma - 2012 - №19 - P. 103112.

59. Yan Y. A 0.423THz Second Harmonic GyrotronOscillator / Y. Yan, X. Li, X. Yuan, W. Fu, D. Liu // Chinese Journal of Electronics - 2013 - №22 - 2 - P. 416-418.

60. Blank M. High-frequency gyrotrons for DNP-enhanced NMR applications / M. Blank, P. Borchard, S. Cauffman, K. Felch, M. Rosay, L. Tometich // InternationalVacuum Electronics Conference, IEEE 22-24 April 2014 Monterey, Ca. P. 7-8.

61. Hornstein M. K. Second Harmonic Operation at 460 GHz and Broad band Continuous Frequency Tuning of a Gyrotron Oscillator / M. K. Hornstein, V. S. Bajaj, R. G. Griffin, K. E. Kreischer, I. Mastovsky, M. A. Shapiro, J. R. Sirigiri, R. J. Temkin // IEEE Trans. Electron Devices - 2005 - №52 - P. 798-807.

62. Bajaj V. S. Dynamic Nuclear Polarization at 9 Tesla Using a Novel 250 GHz Gyrotron Microwave Source / V. S. Bajaj, C. T. Farrar, M. K. Hornstein, I. Mastovsky, J. Bryant, K. E. Kreischer, R. J. Temkin, R. G. Griffin // J. Magn. Resonance - 2003 - №160 - P. 85-90.

63. Hornstein M. K. Efficient Low-Voltage Operation of a CW Gyrotron Oscillator at 233 GHz / M. K. Hornstein, V. S. Bajaj, R. G. Griffin, R. J. Temkin // IEEE Trans. Plasma Sci. - 2007 - №35 - 1 - P. 27–30.

64. Idehara T. Gyrotron FU series – current status of development and applications / T. Idehara, S. Mitsudo, S. Sabchevski, M. Glyavin, I. Ogawa // Int. J. Vacuum - 2001 - №62 - 2-3 - P.123-132.

65. Alberti S. Experimental study from linear to chaotic regimes on a terahertz-frequency gyrotron oscillator / S. Alberti, J.-Ph. Ansermet, K. A. Avramides [et al.] // Phys. Plasmas - $2012 - N_{2}19 - 12 - P$. 123102.

66. Denysenkov V. Liquid state DNP using a 260 GHz high power gyrotron. / V. Denysenkov, M. J. Prandolini, M. Gafurov [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. - 2010 - №12 - 22 - P. 5786-5790.

67. Цветков А. И. Автоматизированный микроволновый комплекс на основе работающего в непрерывном режиме гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц и выходной мощностью 1 кВт / А. И. Цветков, М. В. Морозкин, М. Ю. Глявин, В. И. Малыгин, Л. В. Лубяко, Г. Ю. Голубятников, А. Н. Куфтин, В. Е. Запевалов, А. С. Седов, А. В. Чирков, А. П. Фокин, В. В. Холопцев, А. Г. Еремеев, Е. В. Соколов, Г. Г. Денисов // Изв. вузов. Радиофизика. - 2015 - №58 - 9 - С. 709-719.

68. Глявин М. Ю. Особенности оптимизации подсистем непрерывного гиротрона с частотой генерации 0,26 ТГц на основном циклотронном резонансе / М. Ю. Глявин, Г. Г. Денисов, В. Е. Запевалов, А. Н. Куфтин, В. Н. Мануилов, А. С. Седов, В. В. Холопцев, А. В. Чирков // Изв. вузов. Радиофизика. - 2015 - №58 - 9 - С. 720-731.

69. Glyavin M. Yu. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media / M. Yu. Glyavin, A. V. Chirkov, G. G. Denisov, A. P. Fokin [et al.] // Rev. Sci. Instr. - 2015 - №86 - 5 - P. 054705.

70. Bratman V. L. New versions of terahertz radiation sources for dynamic nuclear polarization in nuclear magnetic resonance spectroscopy / V. L. Bratman, Yu. K. Kalynov, P. B. Makhalov, A. E. Fedotov // Radiophysics and Quantum Electronics - 2014 - №56 - 8–9 - P. 532-541.

71. http://grantome.com/grant/NIH/R44-GM108179-03

72. Glyavin M. Yu. Powerful terahertz gyrotrons based on pulsed magnets / M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin // Terahertz Sci. Technol. - 2009 - №2 - 4 - P. 150-155.

73. Васильев В. В. Проводящие оболочки в импульсном электромагнитном поле / В. В. Васильев, Л. Л. Коленский, Ю. А. Медведев, Б. М. Степанов. М.: Энергоатомиздат, 1982.

74. Glyavin M. Yu. Powerful terahertz gyrotrons based on pulsed magnets / M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin // International journal of Terahertz Science and Technology - 2009 - №2 - 4 - P. 150-155.

75. Glyavin M. Yu. Experimental Study of the Pulsed Terahertz Gyrotron with Record-Breaking Power and Efficiency Parameters / M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, A. A. Bogdashov, V. N. Manuilov, [et al.] // Radiophysics and Quantum Electronics - 2014 - №56 - 8-9 - P. 497-507.

76. Read M. THz Pulse Gyrotron / M. Read, J. Neilson, G. Nusinovich, P. Borchard, R. L. Ives // The 7 Int. Workshop Strong Microwaves: Sources and Applications. N. Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008.

77. Запевалов В. Е. Гиротроны на связанных резонаторах с трансформацией мод. / В. Е. Запевалов, С. А. Малыгин, В. Г. Павельев, Ш. Е. Цимринг // Изв. вузов. Радиофизика. - 1984 - №27 - 9 - С. 1194-1201.

78. Pavelyev V. G. Coupled cavities with mode conversion in gyrotrons / V. G. Pavelyev, Sh. E. Tsimring, V. E. Zapevalov // Int. J. Electronics - 1987 - №63 - 3 - P. 379-391.

79. Запевалов В. Е. Многолучевые гиротроны / В. Е. Запевалов, Ш. Е. Цимринг // Изв. вузов. Радиофизика. - 1990 - №33 - 11 - С. 1288-1295.

80. Запевалов В. Е. Электронно-оптические системы двухлучевых гиротронов / В. Е. Запевалов, В. Н. Мануилов, Ш. Е. Цимринг // Изв. вузов. Радиофизика - 1991 - №34 - 2 - С. 205-211.

81. Manuilov V. N. Development of CW second harmonic double-beam gyrotron with operating frequency 0.79 THz / V. N. Manuilov, M. Yu. Glyavin, A. S. Sedov, V. Yu. Zaslavsky, T. Idehara // Journal IRMM&THz Waves - 2015 - №36 - 12 - P. 164-175.

82. Bratman V. L. Submillimeter-wave large-orbit gyrotron / V. L. Bratman, Yu. K. Kalynov, V. N. Manuilov, S. V. Samsonov // Radiophysics and Quantum Electronics - 2005 - №48 - 10-11 - P. 731-736.

83. Bratman V. L. Large-Orbit Gyrotron Operation in the Terahertz Frequency Range / V. L. Bratman, Yu. K. Kalynov, V. N. Manuilov // Phys. Rev. Lett. - 2009 - №102 - P. 245101.

84. Bratman V. L. Gyrotron development for high power THz technologies in IAP RAS / V. L. Bratman, A. A. Bogdashov, G. G. Denisov, M. Yu. Glyavin [et al.] // Int. J. IRMM&THz Waves - 2012 - №33 - 7 - P. 715-723.

85. Idehara T. A High Harmonic Gyrotron and with an Axis-Encircling Electron Beam and a Permanent Magnet. / T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Iwata [et al.] // IEEE Transaction on Plasma Science - 2004 - №32 - 3 - P. 903-910.

86. Idehara T. Development of a high harmonic gyrotron with an axis-encircling electron beam and a permanent magnet / T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Iwata [et al.] // Elsevier Vacuum - 2005 - N277 - P. 539–546.

87. Samsonov S. V. Development of helical-waveguide gyro-TWT at IAP / S. V. Samsonov, A. A. Bogdashov, G. G. Denisov, A. G. Eremeev [et al.] // Proc. 8th Int. Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves–Sources and Applicatons, N.Novgorod, 2011 - P.9-16.

88. Denisov G. G. Microwave System for Feeding and Extracting Power To and From a Gyrotron Traveling-Wave Tube Through One Window / G. G. Denisov, S. V. Samsonov, S. V. Mishakin, A. A. Bogdashov // Electron Device Lett. 2015

89. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/82364

90. Griffin R. G. High Frequency Dynamic Nuclear Polarization. International Symposium on Development of Terahertz Gyrotrons and Applications / R. G. Griffin // University of Fukui (FIR-FU) 14-15 March 2013 - 7A-2.

91. Wallace V. P. Terahertz pulsed spectroscopy of human Basal cell carcinoma / V. P. Wallace, A. J. Fitzgerald, E. Pickwell, R. J. Pye, P. F. Taday, N. Flanagan, T. Ha // Appl Spectrosc. - 2006 - №60 - 10 - P. 1127-1133.

92. Miyoshi N. Application for hyperthermia treatment of an experimental tumor using a gyrotron (107, 203 GHz) / N. Miyoshi, Y. Fukunaga, I. Ogawa, T. Idehara // Proceeding of 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves - 2009, Busan, South Korea.

93. Han S. T. Application of T-Ray Gyrotron Developed for Real-Time Non-Destructive Inspection to Enhanced Regeneration of Cells Proceedings of the 40th International Conference on Infrared / S. T. Han, W. J. Lee, K. S.Park, S. W.Choi, J. H.Yoon, J. S.Yoo // Terahertz and Millimeter Waves, 23-28 August 2015, Hong Kong, China.

94. Nusinovich G. S. Range, resolution and power of THz systems for remote detection of concealed radioactive materials / G. S. Nusinovich, P. Sprangle, C. A. Romero-Talamas, V. L. Granatstein // Journal of Applied Physics - 2011 - №109 - P. 083303.

95. Granatstein V. L. Detecting Excess Ionizing Radiation by Electromagnetic Breakdown of Air / V. L. Granatstein, G. S. Nusinovich // Journal of Applied ics - 2010 - №108 - P. 063304.

96. Nusinovich G. S. On the sensitivity of THz gyrotron based systems for remote detection of concealed radioactive materials / G. S. Nusinovich, P. Sprangle, V. E. Semenov, D. S. Dorozhkina, M. Yu. Glyavin // Journal of Applied Physics - 2012 - №111 - P. 124912.

97. Glyavin M. Yu. A point-like source of extreme ultraviolet radiation based on a discharge in a non-uniform gas flow, sustained by powerful gyrotron radiation of terahertz frequency band / M. Yu. Glyavin, S. V. Golubev, I. V. Izotov, A. G. Litvak, A. G. Luchinin, S. V. Razin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, A. V. Vodopyanov // Applied Physics Letters - 2014 - №105 - P. 174101.

98. Murakami D. D. An Overview of the NASA Ames Millimeter-Wave Thermal Launch System 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE / D. D. Murakami, K. L. Parkin. // Joint Propulsion Conference and Exhibition 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2012; Atlanta, GA; USA.

99. Saitoh S. Microwave Rocket with 30N thrust and further thrust augmentation with reed-valve air intake / S. Saitoh, R. Komatsu, T. Yamaguchi, K. Komurasaki, Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, K. Sakamoto // 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2012, Seoul, Korea.

100.http://www.darpa.mil/program/video-synthetic-aperture-radar

101.http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2181420?origin_id=x4323

Научное издание

ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Под редакцией А.Е. Храмова, А.Г. Баланова, В.Д. Еремки, В.Е. Запевалова, А.А. Короновского

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой

Подписано в печать 15.03.16		Формат 60×84 1/16
Бум. офсет.	Усл. печ. л. 28,75	Учизд. л. 26,7
Тираж 500 экз.	Заказ 52	C 26
Саратовский государственны	й технический университет	
410054, Саратов, Поли	техническая ул., 77	
Отпечатано в Издательс	тве СГТУ. 410054, Саратов,	Политехническая ул., 77
Тел.: 24-95-70; 99-87-3	9, e-mail: izdat@sstu.ru	