

УДК 621.385.69

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ РАБОТАЮЩЕГО В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ГИРОТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 263 ГГц И ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 1 КВт

М. Ю. Глявин^{1,2*}, *М. В. Морозкин*¹, *А. И. Цветков*¹, *Л. В. Лубяко*¹,
*Г. Ю. Голубятников*¹, *А. Н. Куфтин*¹, *В. Е. Запечалов*^{1,2}, *В. В. Холопцев*¹,
*А. Г. Еремеев*¹, *А. С. Седов*¹, *В. И. Малыгин*¹, *А. В. Чирков*¹, *А. П. Фокин*¹,
*Е. В. Соколов*², *Г. Г. Денисов*^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН;

² ЗАО НПП «Гиком», г. Нижний Новгород, Россия

Статья посвящена экспериментальному исследованию созданного в Институте прикладной физики РАН совместно с ЗАО НПП «Гиком» автоматизированного микроволнового комплекса для микроволновой спектроскопии и диагностики различных сред на основе гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц, работающего на первой гармонике гирочастоты. В ходе экспериментов была достигнута управляемая выходная мощность от 0,1 до 1 кВт с коэффициентом полезного действия до 17% в непрерывном режиме генерации. Приведён измеренный спектр излучения с относительной шириной порядка 10^{-6} и значения частоты, полученные при различных параметрах прибора. Анализируются результаты измерений параметров волнового пучка, сформированного встроенным квазиоптическим преобразователем, а также данные, полученные при измерении тепловых потерь в резонаторе и вакуумном выходном окне.

ВВЕДЕНИЕ

Ряд научно-технических задач, таких как диагностика плотной плазмы, спектроскопия высокого разрешения, контроль состояния атмосферы, медицинские приложения, диктуют необходимость создания источников когерентного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в диапазоне частот 200÷600 ГГц с достаточно высокой выходной мощностью 0,1÷1,0 кВт как в импульсном, так и в непрерывном режимах генерации. Подобные источники, с одной стороны, должны обеспечивать необходимые для конкретного приложения характеристики выходного излучения, а с другой — иметь высокий уровень автоматизации и управления для возможности их интегрирования в более сложные системы.

Среди перечисленных приложений сегодня наиболее активно развивается спектроскопия высокого разрешения на основе ядерного магнитного резонанса/динамической поляризации ядер. Разработка источников излучения для этих целей ведётся в США («CPI-Bruker Biospin»), Японии (Research Center for Development of Far-Infrared region, University of Fukui, FIR FU), Европе, Китае. Для получения в непрерывном режиме генерации мощностей на уровне десятков и сотен ватт на частотах выше 250 ГГц в настоящее время в основном используются гиротроны [1, 2], превосходящие по мощности традиционные вакуумные лампы обратной волны и полупроводниковые источники на несколько порядков [3] и имеющие стоимость, габариты и рабочие напряжения значительно ниже, чем у лазеров на свободных электронах [4]. За последние годы в мире создана серия работающих в импульсном [5–8] и непрерывном [9–11] режимах гиротронов, излучающих в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

* glyavin@appl.sci-nnov.ru

Для спектроскопии и диагностики различных сред в ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП «Гиком» был разработан и изготовлен отпаянный вариант гиротрона со встроенным квазиоптическим преобразователем рабочей моды в узконаправленный волновой пучок, обеспечивающий генерацию на частоте 263,1 ГГц в непрерывном режиме с мощностью до 1 кВт на основной гармонике гирочастоты. Прибор оснащён современной автоматизированной системой управления. В работе приводятся результаты экспериментального исследования данного гиротрона.

1. ОПИСАНИЕ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА

Как известно, необходимым условием для реализации циклотронного резонанса электронов с электромагнитным полем с частотами в терагерцовом диапазоне является создание сильных магнитных полей. Рассматриваемый гиротрон установлен в сверхпроводящий «сухой» криомагнит (без использования жидких азота и гелия) JM7D-10T100 производства компании JASTEC (Япония) [12], создающий магнитное поле величиной до 10 Тл в «тёплом» отверстии с диаметром 100 мм. Такая магнитная система позволяет реализовать генерацию с частотой около 263 ГГц на первой циклотронной гармонике. Магнитная система также включает в себя установленную в области катода дополнительную катушку подмагничивания, которая может использоваться для корректировки параметров электронного пучка.

Расчётная и измеренная частота генерации разработанного гиротрона составила около 263,1 ГГц. Расчётное значение выходной мощности достигало 1 кВт в непрерывном режиме генерации при катодном напряжении 15 кВ и силе тока электронного пучка около 0,4 А. Опти-

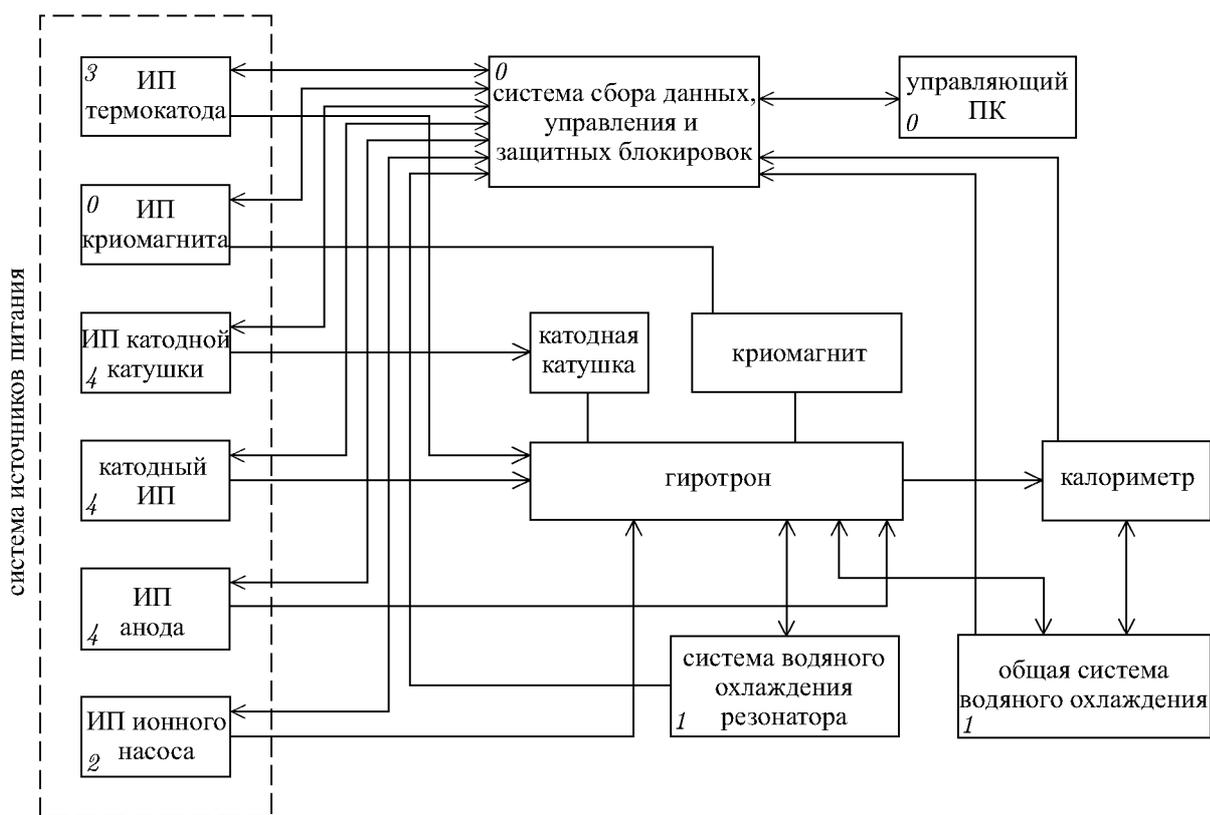


Рис. 1. Блок-схема микроволнового комплекса. При сбое одного из узлов автоматически отключаются узлы с более высокими номерами (ИП — источник питания, ПК — персональный компьютер)

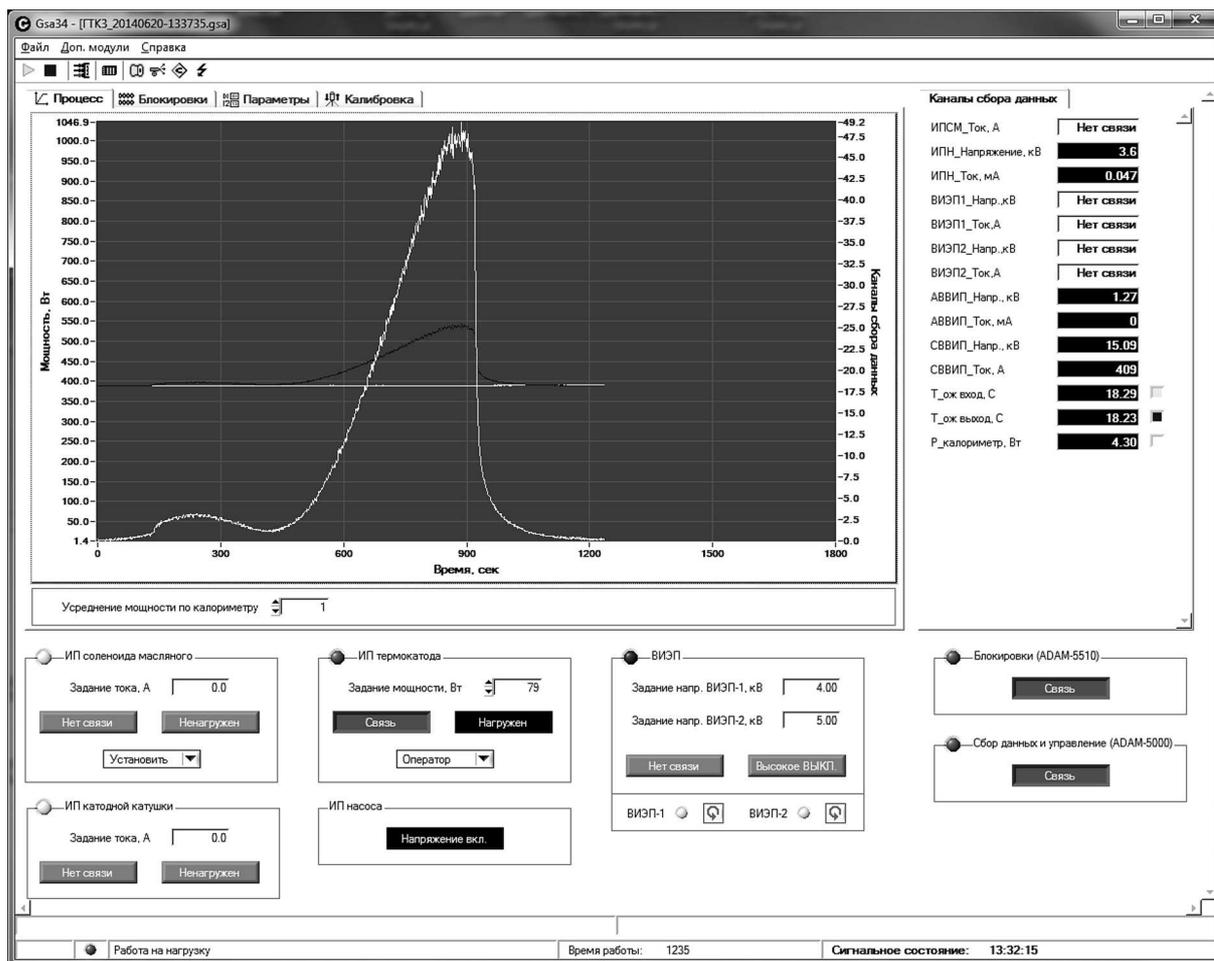


Рис. 2. Диалоговое окно пакета прикладного программного обеспечения управления микроволновым комплексом

мизация электродинамической системы и расчёт мощности и коэффициента полезного действия прибора проводились путём решения систем самосогласованных уравнений электронно-волнового взаимодействия с помощью разработанных в ИПФ РАН кодов. Гиротрон был изготовлен в ЗАО НПП «Гиком». Эмиттер магнетронно-инжекторной пушки сделан из гексаборида лантана LaB_6 . Электронная пушка основана на триодной схеме, что позволяет, в частности, обеспечить значительную гибкость при адаптации системы для тех или иных приложений, например реализовать быструю обратную связь для стабилизации выходной мощности посредством изменения анодного потенциала. Однако в качестве исходного варианта рассматривалось использование пушки в диодном режиме, с анодом, электрически закороченным с корпусом и имеющим земляной потенциал. Мощность подогревателя термокатода в рабочем режиме составляет около 80 Вт, источник питания для него был разработан и изготовлен в ИПФ РАН. В качестве катодного источника использовался высоковольтный источник питания «Spellman ST20N12X» (20 кВ, 600 мА), а в качестве анодного — источник «Spellman SL15N1200» (15 кВ, 80 мА). В качестве рабочей моды была выбрана мода $\text{TE}_{5,3}$. Оптимальный радиус электронного пучка в резонаторе R_b отвечал первому максимуму фактора возбуждения рабочей моды. Длина однородного участка резонатора была выбрана несколько больше оптимальной, чтобы обеспечить эффективное возбуждение рабочей моды в том числе и при сравнительно низком токе порядка нескольких десятков миллиампер.

Это потенциально позволяет использовать маломощные источники питания для тех приложений, где требуемый уровень выходной мощности составляет несколько десятков ватт.

Прибор имеет встроенный квазиоптический преобразователь рабочей моды в узконаправленный волновой пучок, состоящий из волноводного среза, параболического зеркала и четырёх корректирующих зеркал. Максимальная глубина гофрировки поверхности зеркал составляет около 0,15 мм при допустимой точности изготовления 0,02 мм.

Выходное излучение выводится в горизонтальном направлении через вакуумное окно из нитрида бора BN с диаметром 32 мм и толщиной 2,7 мм. Отработанный электронный пучок высаживается на поверхность коллектора с конической формой, обеспечивающей приемлемую тепловую нагрузку даже при наличии погрешностей в юстировке прибора. Гиротрон может работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме генерации.

Микроволновый комплекс оснащён автоматизированной системой управления, в состав которой входят оригинальное программное обеспечение для взаимодействия пользователя с системами гиротрона, а также необходимое компьютерное оборудование. Система управления обеспечивает безопасную работу оператора и комплекса, сбор, регистрацию, отображение и протоколирование информации, а также дистанционное управление различными узлами гиротронной системы. Блок-схема автоматизированного комплекса представлена на рис. 1, цифрами показана последовательность включения и срабатывания защитных блокировок системы: при отказе того или иного узла автоматически отключаются узлы с более высокими номерами.

Наличие развитой системы управления позволяет эффективно пользоваться комплексом широкому кругу исследователей (в том числе исследователям, не имеющим специальной подготовки и навыков), что обеспечивает его высокие потребительские характеристики.

На рис. 2 представлено диалоговое окно пользовательского программного обеспечения, которое фиксирует текущее состояние каждой из подсистем гиротронного комплекса, отображает и вводит рабочие параметры, а также управляет сбором данных и режимом работы каждой подсистемы.

2. КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ

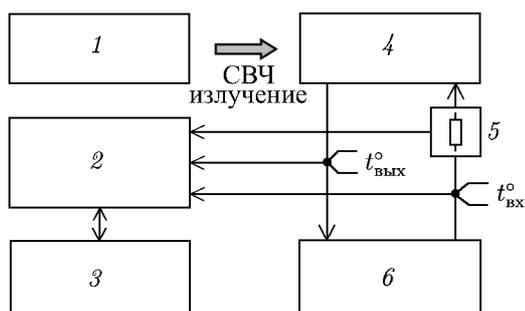


Рис. 3. Блок-схема calorimetric измерений: 1 — гиротрон, 2 — система сбора данных, управления и защитных блокировок, 3 — управляющий персональный компьютер, 4 — calorimeter, 5 — нагреватель (калибровка), 6 — общая система водяного охлаждения

уровне 10 Вт увеличивается до 30%. Температура воды, охлаждающей резонатор, поддерживалась постоянной и равной 25 °С с помощью специальной холодильной машины с точностью

Выходная мощность измерялась с использованием calorimeter, установленного непосредственно за выходным окном. Блок-схема измерений представлена на рис. 3. В контуре водяного охлаждения calorimeter были установлены два термодатчика, измеряющих температуру воды на входе, $t_{\text{вх}}^{\circ}$, и выходе, $t_{\text{вых}}^{\circ}$, calorimeter, а также нагреватель, предназначенный для проведения автоматической процедуры калибровки. Далее по разности температур $t_{\text{вых}}^{\circ} - t_{\text{вх}}^{\circ}$ вычислялась мощность излучения P .

Был проведён ряд calorimetric измерений выходной мощности в зависимости от различных параметров системы. При уровне мощности 100 Вт и выше погрешность при calorimetric измерениях составляет 10%, а на

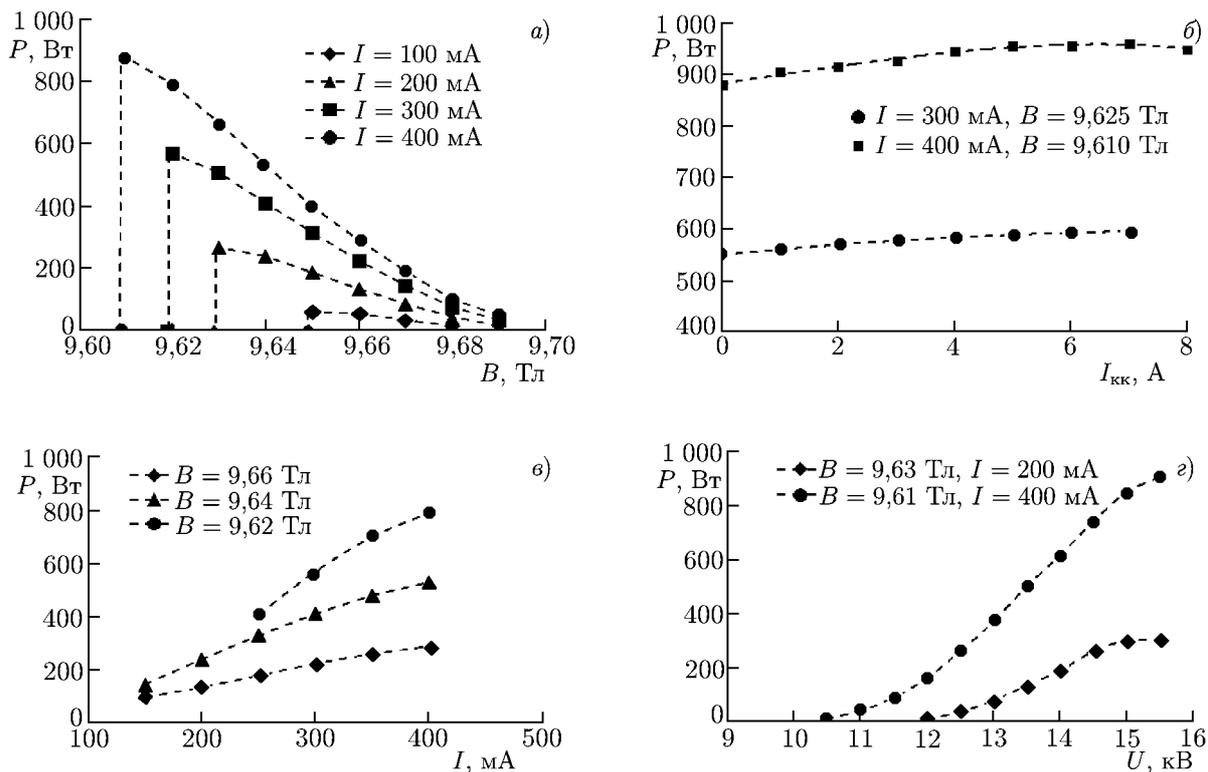


Рис. 4. Зависимость мощности генерации P от величины магнитного поля B (а), силы тока $I_{\text{кк}}$ в катушке подмагничивания (б), силы тока электронного пучка I (в) и от ускоряющего напряжения U (г). На панелях (а)–(в) $U = 15$ кВ

0,5 °С. Источник питания криомагнита («Oxford Instruments Mercury iPS-M») обеспечивает возможность перестройки величины магнитного поля с шагом около 10^{-3} Тл. На рис. 4 представлены зависимости мощности генерации P от величины магнитного поля B в резонаторе, силы тока в катодной катушке подмагничивания $I_{\text{кк}}$, силы тока электронного пучка I и ускоряющего (катодного) напряжения U для рабочей моды $\text{TE}_{5,3}$.

Выходная мощность достигала значения более 0,9 кВт при токе электронного пучка $I = 0,4$ А, катодном напряжении 15 кВ и магнитном поле около 9,605 Тл. При этом максимальный коэффициент полезного действия (КПД) составил около 17%, что хорошо согласуется с результатами расчётов, проведённых на этапе разработки и проектирования гиротрона. Выходная мощность уменьшается примерно в 2 раза при увеличении магнитного поля на 0,04 Тл. При этом необходимо иметь в виду, что киловаттная мощность генерации избыточна для большинства спектроскопических приложений, где требуемая мощность составляет величину порядка десятков ватт. В этой связи перспективным представляется экспериментально реализованный режим генерации при ускоряющем напряжении 14 кВ и очень малом токе 0,02 А. В этом режиме было получено достаточное для указанных приложений значение мощности около 10 Вт с коэффициентом полезного действия около 3%. Следует отметить, что возможность работы в таком режиме существенно снижает требования к основному источнику питания. В то же время режим с полной мощностью киловаттного уровня может быть востребован для технологических приложений.

Полученные данные показывают, что выбор режима работы системы по выходной мощности может быть сделан с помощью подбора целого ряда параметров. Это обеспечивает высокую гибкость системы с точки зрения её использования для различных приложений. Использование дополнительной катодной катушки подмагничивания, установленной в катодной области,

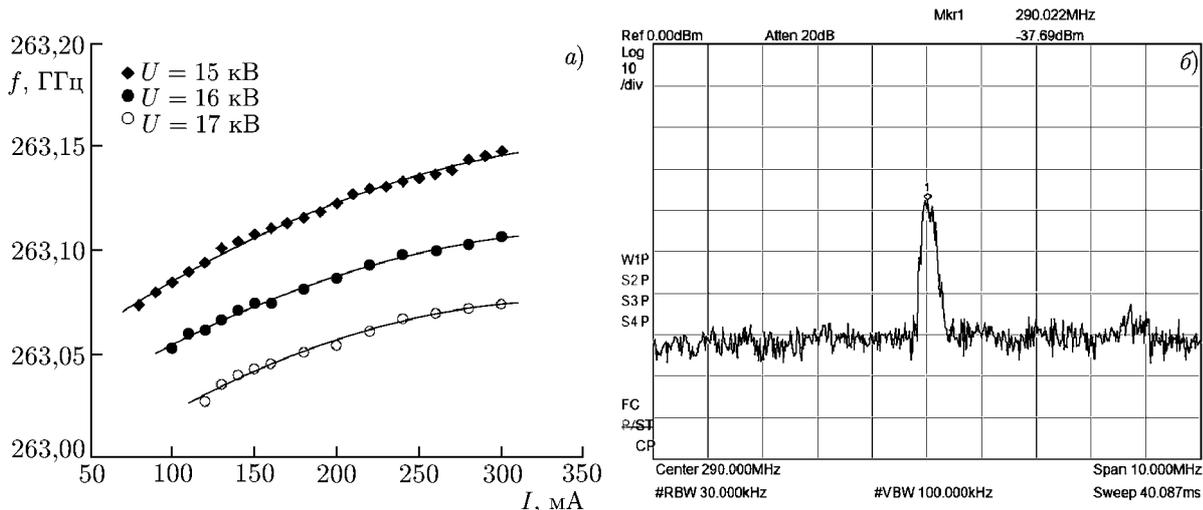


Рис. 5. Зависимость частоты генерации f от тока электронного пучка I при различных значениях ускоряющего напряжения U и температуре резонатора $T = 35^\circ\text{C}$ при $B = 9,67$ Тл (а) и изображение спектра сигнала на экране анализатора (б)

позволяет в небольших пределах подстраивать выходные параметры излучения, что может быть использовано как один из возможных механизмов при реализации системы автоматической стабилизации мощности.

3. ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ

Измерения частоты проводились следующим образом. Небольшая часть излучения через ответвитель подавалась на гармонический смеситель, где она смешивалась с высокостабильным

сигналом внешнего гетеродина, имеющего частоту f_{LO} . Поступающий из смесителя сигнал на промежуточной частоте f_{IF} подавался на анализатор спектра. Затем частота генерации f определялась как $n f_{LO} \pm f_{IF}$, где n — номер гармоники. На рис. 5а представлены экспериментальные зависимости частоты генерации f от тока электронного пучка I при различных значениях ускоряющего напряжения U при фиксированном магнитном поле $B = 9,67$ Тл.

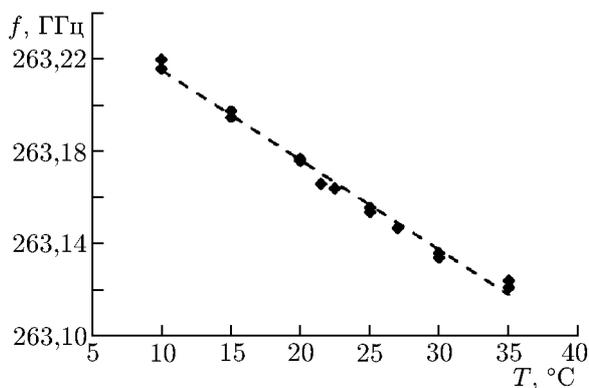


Рис. 6. Зависимость частоты генерации f от температуры жидкости T в контуре охлаждения резонатора

Достигнутая величина перестройки частоты при изменении температуры составила около 4 МГц/°С, а при изменении катодного напряжения — около 33 МГц/кВ. Ширина спектра Δf составила около 0,5 МГц ($\Delta f/f \approx 10^{-6}$). На рис. 5б представлен снимок экрана анализатора спектра при проведении указанных измерений.

Изменение температуры резонатора позволяет осуществлять перестройку частоты прибора в небольших пределах. На рис. 6 показана экспериментальная зависимость частоты излучения от температуры жидкости в контуре охлаждения резонатора при фиксированных параметрах прибора ($B = 9,66$ Тл, $I = 250$ мА, $U = 15$ кВ).

4. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В РЕЗОНАТОРЕ И ВЫХОДНОМ ОКНЕ

Измерение тепловых потерь в резонаторе и окне гиротрона чрезвычайно важно с точки зрения изучения свойств материалов, из которых они изготавливаются, в субтерагерцовом диапазоне частот. В частности, при выборе рабочего режима маломощных терагерцовых гиротронов на этапе разработки и проектирования очень важным является правильная оценка омических потерь. Омическая добротность резонатора из идеальной меди, Q_{ohm} , обычно рассчитывается для моды TE_{mp} по следующей формуле:

$$Q_{\text{ohm}} = \frac{R_0}{\delta_{\text{skin}}} \left(1 - \frac{m^2}{\nu_{mp}^2} \right), \quad (1)$$

где R_0 — радиус однородного участка резонатора, δ_{skin} — толщина скин-слоя, m — азимутальный индекс моды, ν_{mp} — собственное число моды, являющееся p -м корнем уравнения $dJ_m(r)/dr = 0$, $J_m(r)$ — функция Бесселя первого рода. Для расчётов в данную формулу обычно вводится поправочный коэффициент, зависящий в основном от шероховатости поверхности резонатора, которая определяется, в частности, качеством изготовления. Величина омических потерь, особенно в случае, когда они становятся сравнимыми с выходной мощностью прибора, достаточно сильно влияет на выбор оптимальных параметров гиротрона. Поэтому с целью уточнения теоретической модели представляется важным экспериментальное определение указанного коэффициента.

Измерение мощности потерь в резонаторе было выполнено по схеме, представленной на рис. 3, однако контур охлаждения калориметра был переключён на резонатор. На рис. 7 показана зависимость мощности тепловых потерь в стенках резонатора от выходной мощности излучения.

Омическая добротность рассчитывалась исходя из соотношения $P_{\text{ohm}} = (Q_{\text{dif}}/Q_{\text{ohm}})P$, где Q_{dif} — дифракционная добротность, которая определялась на этапе проектирования прибора с учётом реальных геометрических размеров резонатора. Измеренная мощность тепловых потерь составила около 30% от мощности выходного излучения. Расчётное значение омической добротности Q_{ohm} , полученное при введении в формулу (1) эмпирического коэффициента $1/2$, составило около 8800, а значение, полученное в результате измерений — около 12000. Таким образом, значение омической добротности в 1,36 раз больше, чем для идеальной меди.

Мощность потерь в вакуумном окне была измерена таким же образом и составила около 7% от выходной мощности излучения, что достаточно хорошо согласуется с расчётными данными.

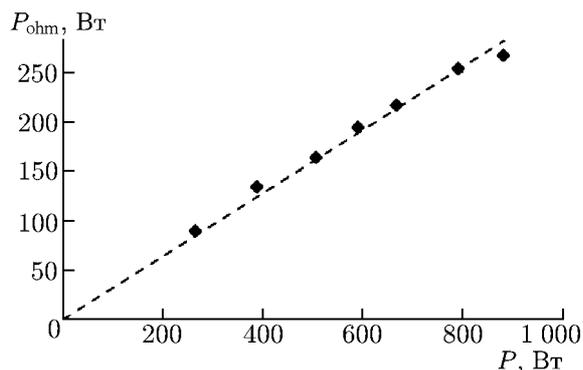


Рис. 7. Зависимость мощности тепловых потерь в стенках резонатора от мощности излучения

5. ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫХОДНОМ ПУЧКЕ ГИРОТРОНА

Измерение распределения мощности СВЧ излучения гиротрона проводилось в нескольких сечениях при распространении волнового пучка в свободном пространстве по тепловизионной методике [13]. Схема измерений приведена на рис. 8.

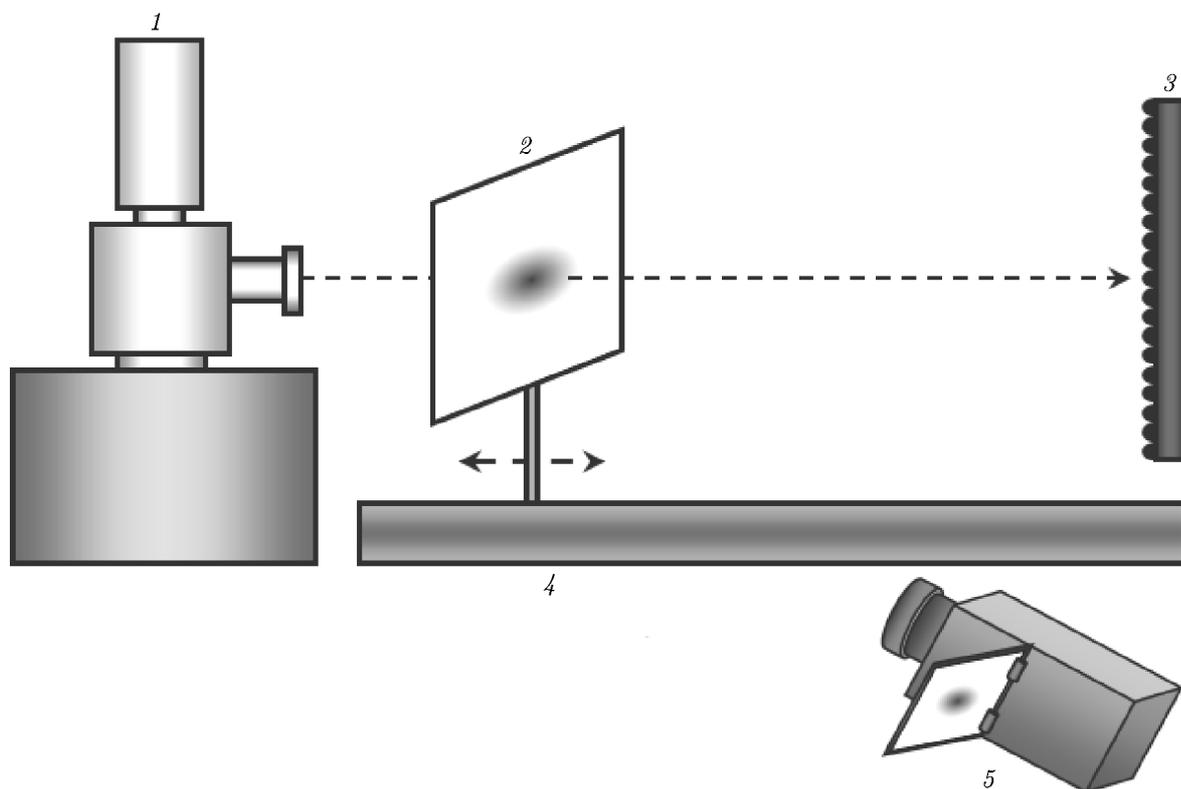


Рис. 8. Схема измерений распределения мощности выходного сверхвысокочастотного излучения гиротрона с помощью инфракрасной камеры: 1 — гиротрон, 2 — экран, 3 — нагрузка, 4 — направляющий рельс, 5 — тепловизор

Для измерений использовалась инфракрасная камера «VarioScan 3021 ST», имеющая высокое разрешение по температуре $0,03^\circ\text{C}$, что позволяет получить динамический диапазон измеряемых данных не менее 30 дБ при нагреве экрана на 30°C . Распределение температуры на диэлектрическом экране соответствует распределению интенсивности проходящего сквозь экран выходного СВЧ излучения гиротрона [13]. Измерения проводились в нескольких сечениях, что позволяет восстановить распределение фазы [14, 15]. Присущую обратным задачам некорректность в данном случае можно контролировать, используя очевидный критерий, заключающийся в том, что полученное решение должно подчиняться волновому уравнению: поперечные распределения реконструированного поля должны совпадать (с точностью до экспериментальных погрешностей) с измеренными распределениями в произвольных контрольных сечениях, не используемых в процедуре реконструкции.

Измеренные распределения амплитуды поля в поперечных сечениях волнового пучка гиротрона представлены на рис. 9.

Также на рис. 9 приводятся реконструированные распределения фазы в этих сечениях, обеспечивающие взаимную трансформацию измеренных амплитудных распределений вследствие дифракции с эффективностью более 98%. Как показывает анализ, содержание волны $\text{TEM}_{0,0}$ в реконструированном волновом пучке составляет 93%. Восстановив фазовое распределение в поперечных сечениях и зная амплитудные распределения волнового пучка, можно получить информацию обо всей трёхмерной структуре поля, прежде всего на входе зеркальной системы (двухзеркального квазиоптического фильтра), служащей для согласования с линией передачи.

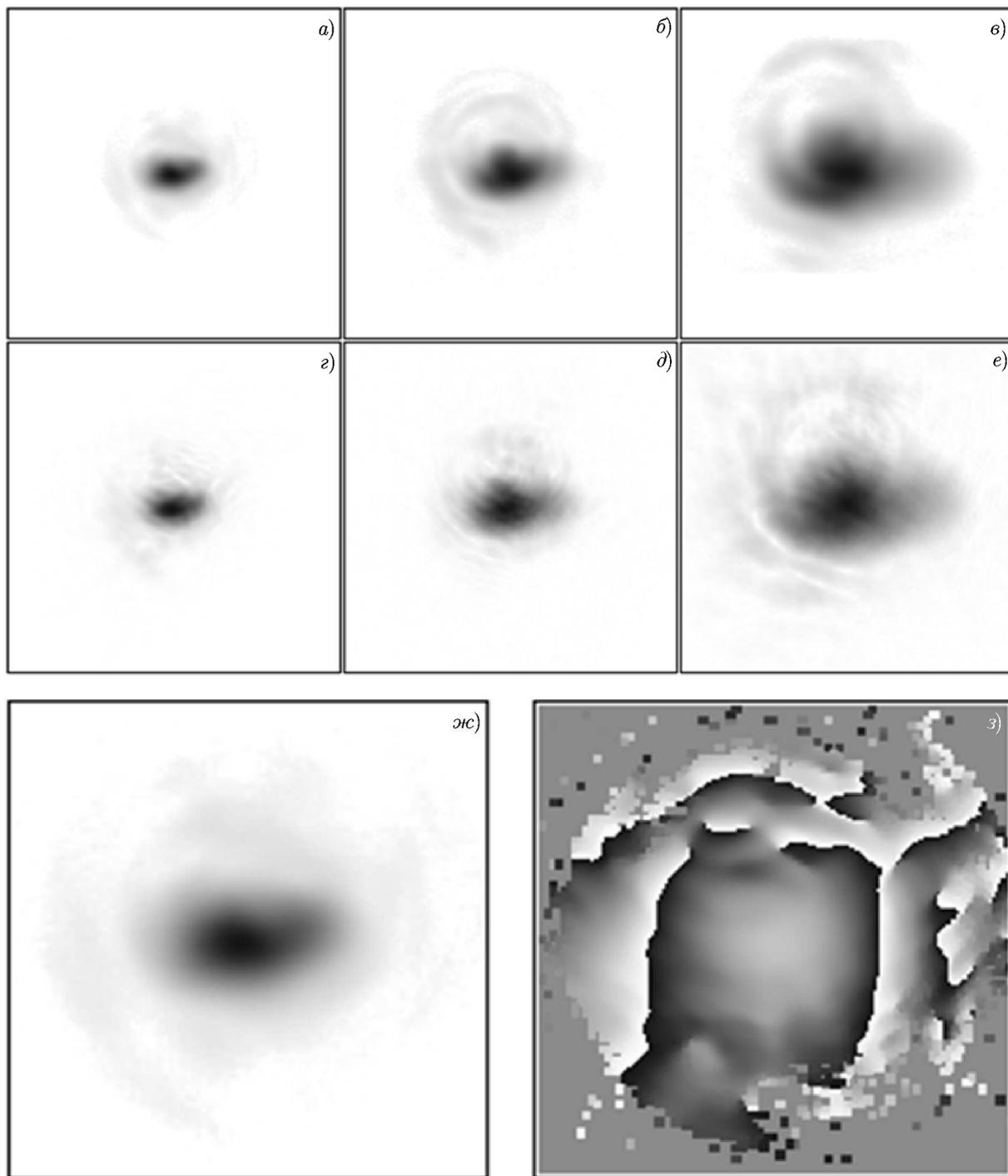


Рис. 9. Измеренные распределения амплитуды поля в поперечных сечениях волнового пучка на различных дистанциях от окна гиротрона и реконструированные распределения амплитуды в этих сечениях. Дистанции 237 мм соответствуют панелям (а) и (г), 387 мм — (б) и (д), 687 мм — (в) и (е). Апертура составляет 200×200 мм. Также показаны распределения амплитуды (ж) и реконструированной фазы (з) СВЧ излучения на расстоянии $Z = 237$ мм от выходного окна гиротрона. Более тёмные области соответствуют большему значению амплитуды/фазы. Мода $TEM_{0,0}$ обеспечивает 93 % измеренного распределения амплитуды поля

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы характеристики работающего в непрерывном режиме гиротронного комплекса, существенно превосходящего по мощности зарубежные аналоги [9, 10] (развёрнутый обзор работ по созданию терагерцевых гиротронов и их сравнение с другими источниками терагерцевого излучения представлены, в частности, в работах [9, 16–18]). Достигнута устойчивая одномодовая генерация на первой гармонике гирочастоты, в том числе при малых рабочих токах пучка, что существенно ослабляет требования к мощности и габаритам источников питания. Показана возможность подстройки частоты при изменении температуры резонатора или рабочего напряжения, что является необходимым для ряда задач. Хорошее совпадение расчётных и экспериментальных значений мощности, коэффициента полезного действия и частоты генерации свидетельствует о правильности технологических решений, использованных в процессе изготовления прибора и позволяет рассчитывать на успешную реализацию микроволновых систем с частотами 527 и 790 ГГц, разработка и испытание которых планируются в 2015–2016 годах. В качестве источника излучения в этих системах будут использованы гиротроны на второй гармонике гирочастоты, в которых для улучшения селекции мод могут быть применены многолучевые электронно-оптические системы.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 14–12–00887).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zaytsev N. I., Pankratova T. B., Petelin M. I., Flyagin V. A. // *Radio. Eng. Electron. Phys.* 1974. V. 19. P. 95.
2. Nusinovich G. S. *Introduction to the physics of gyrotrons*. Baltimore, MD: Johns Hopkins Univ. Press, 2004. P. 335.
3. Booske J. H. // *Phys. Plasmas*. 2008. V. 15, No. 5. Art. no. 055502.
4. Huang Z., Kim K.-J. // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2007. Art. no. 034801.
5. Idehara T., Mitsudo S., Sabchevski S., et al. // *Vacuum*. 2001. V. 62, No. 2–3. P. 133.
6. Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. Yu. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100, No. 1. Art. no. 015101.
7. Bratman V. L., Kalynov Yu. K., Manuilov V. N. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102, No. 24. P. 245 101.
8. Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Nusinovich G. S., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 153 503.
9. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., et al. // *IEEE Trans.* 2011. V. TST-1, No. 1. P. 54.
10. Idehara T., Sabchevski S. P. // *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 2012. V. 33, No. 7. P. 667.
11. Венедиктов Н. П., Дубров В. В., Запевалов В. Е. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
12. http://www.jastec-inc.com/e_products_nmr/detail24.html
13. Kuznetsov S. O., Malygin V. I. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 1991. V. 12, No. 11. P. 1 241.
14. Chirkov A. V., Denisov G. G., Aleksandrov N. L. // *Opt. Commun.* 1995. V. 115, P. 449.
15. Chirkov A. V., Denisov G. G. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 2000. V. 21, No. 1. P. 83.
16. Bratman V., Glyavin M., Idehara T., et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2009. V. 37, No. 1. P. 36.
17. Thumm M. // *KIT-SR_7693*, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2014. P. 172.
18. Glyavin M. Yu., Idehara T., Sabchevski S. P. // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technology*. 2015. V. 5, No. 5. P. 788.

Поступила в редакцию 24 апреля 2015 г.; принята в печать 30 сентября 2015 г.

**AUTOMATED MICROWAVE COMPLEX ON THE BASIS
OF A CONTINUOUS-WAVE GYROTRON WITH AN OPERATING
FREQUENCY OF 263 GHz AND AN OUTPUT POWER OF 1 kW**

*Glyavin M. Yu., Morozkin M. V., Tsvetkov A. I., Lubyako L. V., Golubyatnikov G. Yu.,
Kuftin A. N., Zapevalov V. E., Kholoptsev V. V., Eremeyev A. G., Sedov A. S., Malygin V. I.,
Chirkov A. V., Fokin A. P., Sokolov E. V., and Denisov G. G.*

We study experimentally the automated microwave complex for microwave spectroscopy and diagnostics of various media, which was developed at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences in cooperation with GYCOM Ltd. on the basis of a gyrotron with an operating frequency of 263 GHz and operated at the first gyrofrequency harmonic. In the process of the experiments, a controllable output power of 0.1–1 kW was achieved with an efficiency of up to 17% in the continuous-wave generation regime. The measured radiation spectrum with a relative width of about 10^{-6} is presented, as well as the frequency values measured at various parameters of the device. The results of measuring the wave beam parameters, which were formed by the built-in quasioptical converter, are analyzed, as well as the data obtained by measuring the heat loss in the cavity and the vacuum output window.