УДК 621.385.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ГИРОТРОНА С РЕКОРДНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ МОЩНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

М. Ю. Глявин ^{1,4}, А. Г. Лучинин ^{1,4}, А. А. Богдашов ¹, В. Н. Мануилов ^{1,2}, М. В. Морозкин ¹, Ю. Родин ¹, Г. Г. Денисов ^{1,4}, Д. Кашин ³, Дж. Роджерс ³, К. А. Ромеро-Таламас ³, Р. Пу ³, А. Г. Шкварунец ³, Г. С. Нусинович ³

¹ Институт прикладной физики РАН;

 2 Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия 3 Центр исследований в области прикладного электромагнетизма, Мэрилендский университет, США 4 «ЗАО НПП «ГИКОМ», г. Нижний Новгород, Россия

В работе описаны результаты экспериментального исследования мощного (сотни киловатт) импульсного (длительность импульса порядка 30 мкс) субтерагерцового гиротрона с частотой генерации, соответствующей одному из окон прозрачности атмосферы. Гиротрон с рабочей частотой 0,67 ТГц, мощностью более 200 кВт при коэффициенте полезного действия (КПД) 20÷25 % использовался для экспериментов по инициации локализованного разряда в плазме. В статье приводятся данные об измерении температурного поля эмиттера, калориметрическом измерении мощности и КПД гиротрона, конструкции квазиоптического преобразователя излучения в узконаправленный волновой пучок. Кратко описаны первые эксперименты по терагерцовому разряду в сфокусированном волновом пучке гиротрона.

ВВЕДЕНИЕ

Для источников мощного когерентного терагерцового излучения существует широкий спектр приложений [1, 2]. Однако мощные и компактные источники терагерцового излучения отсутствуют. Наиболее перспективным терагерцовым генератором для ряда приложений, требующих высокого (порядка 100 кВт) уровня мощности при длительности импульса порядка 10÷100 мкс, представляется гиротрон [3, 4], который по мощности на несколько порядков превосходит традиционные вакуумные лампы обратной волны и полупроводниковые источники [5], а его стоимость, габариты и рабочие напряжения значительно ниже, чем у лазеров на свободных электронах (см., например, [6] и приведённые там ссылки).

Как известно, необходимым условием для реализации циклотронного резонанса электронов с собственным колебанием электромагнитного поля в объёмном резонаторе в терагерцовом диапазоне частот является создание сильного магнитного поля. Такое поле наиболее просто может быть получено в импульсном неразрушающем соленоиде.

Впервые генерация субмиллиметрового излучения в гиротроне была описана в работе [7], в которой на базе субрелятивистского электронного пучка в сильном однородном магнитном поле была достигнута генерация на частоте 0,36 ТГц при мощности 1 мВт и длительности импульса 100 мкс. Позднее в 70–80-х годах прошлого века успешные эксперименты с субмиллиметровыми гиротронами были выполнены в ИПФАН [3, 8]. В первой из этих работ была получена генерация излучения на второй гармонике гирочастоты в непрерывном режиме на частоте 0,32 ТГц с мощностью 1,5 кВт и КПД выше 6%. В экспериментах с гиротроном с импульсным соленоидом для серии мод вплоть до частоты 0,55 ТГц была получена мощность свыше 60 кВт при длительности импульса около 50 мкс. В течение длительного времени прогресс в разработке гиротронов с импульсными соленоидами ограничивался возможностями получения в них сильного поля. В начале

М. Ю. Глявин, А. Г. Лучинин, А. А. Богдашов и др.

ХХІ века в ИПФ РАН и Центре по разработке приборов дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, г. Фукуи, Япония) были созданы оригинальные магнитные системы, позволившие впервые реализовать гиротроны с рабочими частотами выше 1 ТГц: 1,0 и 1,3 ТГц на основном циклотронном резонансе при мощностях 5 и 0,5 кВт соответственно [9]; 1,02 ТГц на второй циклотронной гармонике с мощностью в несколько десятков ватт [10]; 1 ТГц на третьей циклотронной гармонике с мощностью 0,5 кВт в гиротроне с приосевым электронным пучком [11]. Более подробный обзор терагерцовых гиротронов приведён в работе [12].

В настоящее время наиболее перспективными приложениями мощного импульсного терагерцового излучения представляются дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения [13] и инициация точечного разряда в газах для последующей генерации интенсивных пучков многозарядных ионов и их использования в литографии высокого разрешения [14]. Для решения этих задач в ИПФ РАН совместно с Мэрилендским университетом (США) были разработаны и изготовлены два идентичных гиротрона с импульсными соленоидами, охлаждаемыми жидким азотом. Принцип дистанционной регистрации ионизирующих излучений, требования к используемому для этого источнику сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, основные конструктивные особенности гиротрона и результаты теоретического исследования электронно-оптической и электродинамической систем детально изложены в статьях [15, 16]. Главные результаты эксперимента кратко описаны в работе [17].

Настоящая статья посвящена детальному описанию экспериментов с вышеупомянутым гиротроном и структурирована следующим образом: в разделе 1 приводятся основные характеристики гиротрона, позволяющие использовать его для регистрации источников ионизирующего излучения с расстояния в 20÷50 м, а также основные расчётные параметры такого прибора. В разделе 2 описаны результаты экспериментов, проведённых в Мэрилендском университете и ИПФ РАН. В Заключении сформулированы основные результаты работы.

1. ПРИНЦИП ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ГИРОТРОНА

Известно, что даже экранированый источник ионизирующего излучения способен генерировать гамма-излучение, которое, в свою очередь, ионизирует молекулы воздуха. Также известно, что при фокусировке мощного СВЧ излучения в объём с характерными размерами порядка длины волны возможно превышение порогового значения электрического поля и возникновение СВЧ пробоя [13]. На базе этих положений Г. С. Нусинович и В. Л. Гранатштейн предложили принцип дистанционного обнаружения скрытых радиоактивных источников [13]. Суть метода заключается в следующем: если сфокусировать в небольшой объём достаточно мощное излучение, то можно реализовать условия, при которых электрическое поле превышает пороговое значение, требуемое для возникновения СВЧ разряда. Однако вероятность нахождения в данном объёме свободного электрона, инициирующего разряд, при естественном ионизационном фоне мала. Статистика возникновения разряда в серии импульсов, таким образом, служит индикатором превышения естественного фона. Предварительные оценки [18] показывают, что фокусировка излучения с мощностью 200 кВт на частоте 0,67 ТГц в фокальное пятно с диаметром 1÷2 мм позволяет обнаружить источники ионизирующего излучения, когда степень вызываемой ими ионизации более чем в 20 раз превышает естественный фон. При таких параметрах СВЧ излучения и источника ионизации дальность обнаружения последнего составляет 20÷40 м [19]. Выбор частоты излучения гиротрона (0.67 ТГц) был обусловлен наличием на данной частоте окна прозрачности атмосферы с потерями около 50 дБ/км, а также близостью этой частоты к минимуму пашеновской кривой



Рис. 1. Оптимизированный профиль резонатора с добротностью, $Q = 3\,640~(a)$. Зависимость КПД гиротрона от магнитного поля для различных значений скоростного разброса (б). Кривая 1 отвечает скоростному разбросу электронов 0 %, 2 - 5 % и 3 - 10 %

при атмосферном давлении.

Основные расчётные параметры реализованной установки следующие. Для создания импульсного магнитного поля с индукцией до 30 Тл при частоте следования импульсов 1 раз в 3 мин используется импульсный соленоид из замоноличенной медной проволоки, намотанный непосредственно на корпус гиротрона. Магнетронно-инжекторная пушка с катодом из LaB₆ формирует при рабочем напряжении в 50÷70 кВ электронный пучок с током 15÷30 А при питч-факторе (т. е. отношении скорости вращения электронов к скорости их поступательного движения) $\alpha = 1,3$ и разбросе поперечных скоростей 10%. Выбор рабочей моды гиротрона TE_{31,8} был обусловлен возможностью получить достаточно высокий КПД (свыше 20%), а также экспериментальными данными о возможности селективного одномодового возбуждения указанной моды в мощных гиротронах [20]. Для формирования узконаправленного волнового пучка был рассчитан простейший квазиоптический преобразователь [21], состоящий из излучателя в виде козырька на срезе цилиндрического волновода и параболического и фокусирующего зеркал.

Чтобы сопоставить результаты расчётов и экспериментов, проанализируем более подробно режим генерации. Оптимизация электродинамической системы и расчёт мощности и КПД гиротрона проводились при помощи самосогласованных кодов для нестационарных задач, разработанных в ИПФ РАН [22] и МАСҮ [23]. Целью расчёта являлась оптимизация длины резонатора для получения максимального КПД при заданных напряжении на катоде, токе электронного пучка и питч-факторе. На частоте 0,67 ТГц для моды $TE_{31,8}$ при питч-факторе 1,3, токе 15 А и напряжении 70 кВ численные оценки параметров резонатора дают следующие значения [24]. Длина однородного участка цилиндрического резонатора 3,85 мм, омическая добротность $Q_{\Omega} =$ $= 30\,000$, дифракционная добротность $Q_{\rm D} = 3\,000$, орбитальный (поперечный) КПД $\eta_{\perp} = 0,66$, полный КПД $\eta = \eta_{\perp} (1 - Q/Q_{\Omega}) \alpha^2/(1 + \alpha^2) = 0,35$.

Как уже отмечалось выше, выбор рабочей моды был обусловлен желанием обеспечить приемлемый уровень омических потерь, составляющих примерно 10% от мощности генерируемого излучения. В результате исследований был найден оптимизированный профиль резонатора с радиусом прямой секции 4,54 мм и длиной 3,85 мм (см. рис. 1*a*). В таком резонаторе радиус электронного пучка 2,3 мм соответствует максимуму функции возбуждения для выбранной рабочей моды. Зависимость КПД от магнитного поля для различных величин скоростного разброса показана на рис. 16. Можно утверждать, что эффекты скоростного разброса сказываются незначительно. Следует отметить, что в работе [15] показано, что при увеличении длины резонатора

до 7 мм мощность излучения возрастает, однако при этом увеличивается тепловая нагрузка на стенку резонатора.

Как следует из рис. 16, оптимальное магнитное поле примерно равно 27 Тл. Для поддержания оптимального режима работы гиротрона необходимо иметь хорошую воспроизводимость (с точностью $\pm 0,1\%$) амплитуды магнитного поля от импульса к импульсу. Для этой цели был разработан источник магнитного поля с полной запасённой энергией порядка 20 кДж, который формирует импульс тока, по форме близкий к половине синусоиды и имеющий длительность 2,5 мс и амплитуду до 7,5 кА. Требуемая воспроизводимость амплитуды поля достигнута точным контролем напряжения на источнике питания, а также термостабилизацией и уменьшением омических потерь при охлаждении соленоида жидким азотом.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Реализация описываемого гиротрона в виде разборного прибора с непрерывной откачкой позволяла быстро проводить замену резонаторов. Как известно, при работе с импульсным магнитным полем выбор материала резонатора определяется компромиссом между противоречивыми требованиями минимального ослабления поля соленоида вихревыми токами (для чего требуется малая проводимость материала резонатора) и минимальных омических потерь (для чего требуется высокая проводимость материала резонатора). Для экспериментов были изготовлены несколько резонаторов из бериллиевой бронзы и нержавеющей стали. Для уменьшения омических потерь на внутреннюю поверхность стального резонатора электролитическим методом наносилось медное покрытие с толщиной 10 мкм. Длина цилиндрической секции варьировалась от 4 до 6 мм. Также при помощи кода «ELCUT» был рассчитан временной профиль импульса магнитного поля, проникающего внутрь медного резонатора с толщиной стенки 2,5 мм. Индукция поля в этом случае снижается примерно на 20% и наблюдается задержка максимума поля относительно максимума импульса тока на 1 мс. Следует отметить, что в ходе экспериментов в Мэрилендском университете подобный медный резонатор был практически сразу деформирован механическими напряжениями, возникающими при прохождении импульса. Это подтвердило целесообразность использования (по аналогии с предшествующими работами [8, 9]) в качестве основных материалов для резонатора стали и бронзы. Экспериментальные исследования проводились на двух идентичных гиротронах, размещённых на экспериментальных стендах Мэрилендского университета и ИПФ РАН.

В Мэрилендском университете особое внимание было уделено влиянию глубины вакуума в гиротроне на эмиссионные свойства катода и режим генерации, исследована воспроизводимость магнитного поля от импульса к импульсу, измерена однородность температуры по катоду (во многом определяющая однородность эмиссии электронов) и получены данные о пространственном распределении мощности в узконаправленном волновом пучке. В ИПФ РАН основное внимание было уделено экспериментальной оптимизации длины пространства взаимодействия электромагнитного поля с электронным пучком и оптимизации положения катода. После получения необходимого уровня мощности в ИПФ РАН были начаты эксперименты по инициации газового разряда при различных давлениях.

Известно, что катод, изготовленный из LaB₆, не восприимчив к воздействию атмосферы и может восстанавливать свои эмиссионные свойства после специальной процедуры прогрева эмиттера, т. е. активации. В ходе экспериментов лампа полностью вскрывалась при нормальном атмосферном давлении около 10 раз. Тем не менее, катод не утратил эмиссионных свойств, так что ток накала, требуемый для достижения номинального тока электронного пучка, практически не изме-

М. Ю. Глявин, А. Г. Лучинин, А. А. Богдашов и др.



Рис. 2. Распределение температуры на эмиттере. На панели (δ) меньшей температуре отвечает более тёмный тон

нился. На специальном вакуумном стенде катод был прогрет до рабочей температуры и была зафиксирована приемлемая однородность радиального распределения температуры. Кольцо эмиттера было разделено на 16 участков, и температура каждого участка была измерена при помощи пирометра «Mikron M77». При мощности нагрева эмиттера порядка 250 Вт температура на его различных участках находилась в пределах от 1 150 до 1 180 °C (рис. 2).



Рис. 3. Зависимость амплитуды тока соленоида от напряжения ёмкостного накопителя источника питания

Зависимость тока соленоида от зарядного напряжения ёмкостного накопителя источника питания соленоида представлена на рис. 3. Можно утверждать, что от импульса к импульсу амплитуда поля воспроизводится с точностью 0,05 %, достаточной для стабильной генерации одной и той же рабочей моды.

Внешний вид гиротрона с внешним квазиоптическим преобразователем моды в узконаправленный волновой пучок и продольный разрез прибора приведены на рис. 4.

Измерение частоты в терагерцовом диапазоне в режиме разовых импульсов с учётом возможного дрейфа частоты от импульса к импульсу из-за нестабильностей источников питания и сопротивления соленоида [9, 12] представляет собой до-

статочно сложную задачу. В силу условия циклотронного резонанса на частоте отсечки, частота генерации гиротрона равна релятивистской циклотронной частоте, определяемой магнитным полем в резонаторе. Последняя может оцениваться по магнитному полю, пропорциональному току соленоида. Ток соленоида, в свою очередь, определяется исходя из калибровки по датчику Холла при постоянном малом токе. Конечно, этот метод измерения частоты генерации весьма приблизителен. Однако, для поставленной цели достаточно определить частот генерации с точностью порядка 10 ГГц. Это объясняется тем, что в отличие от спектроскопических задач или приложений в области управляемого термоядерного синтеза, здесь отсутствует необходимость поддерживать резонансные условия с внешним объектом, а полоса прозрачности атмосферы достаточно широка. В дальнейшем более точное измерение частоты планируется выполнить при помощи k-спектрометра [24, 25]. Для этой цели узконаправленный волновой пучок микроволно-



Рис. 4. Внешний вид системы с установленным внешним квазиоптическим преобразователем (a), внешний вид гиротрона (б) и схематичный разрез лампы (e): 1 — шины питания магнита, 2 — выходное окно, 3 — магнит, 4 — дьюар для жидкого азота, 5 — ввод хладагента для охлаждения электронной пушки, 6 — электронная пушка, 7 — фланец для откачки остаточного газа, 8 — контакт высоковольтной системы питания, 9 — поддерживающая опора

вого излучения, сформированный внешним квазиоптическим преобразователем, направляется на эшелетт и детектором определяется положение (-1)-го дифракционного максимума. При этом длина волны может быть найдена из условия брегговского рассеяния с точностью до несколько процентов [25]. В проведённых экспериментах форма импульса излучения регистрировалась полупроводниковым детектором. При изменении амплитуды магнитного поля была обнаружена

М. Ю. Глявин, А. Г. Лучинин, А. А. Богдашов и др.



Рис. 5. Фотографии резонатора до (*a*) и после (*б*) экспериментов в Мэрилендском университете. Стрелки указывают на дефекты внутренней поверхности, возникшие в результате микропробоев

рабочая зона, которая соответствовала расчётному типу колебаний при магнитном поле около 27 Тл, напряжении и токе электронного пучка 70 кВ и 15 А соответственно. Режимы генерации согласуются с оценками работ [15, 16]. Утверждение о генерации на рабочей моде TE_{31,8} основано на том, что согласно расчётам максимальная мощность излучения достигается при работе именно на этой моде, а технические параметры рабочего режима выбирались из условия достижения максимальной мощности. В то же время, поскольку внешний преобразователь имеет простейшую геометрию в виде излучающего козырька, параболы и фокусирующего зеркала, эффективность преобразования примерно одинакова для рабочей и ближайших к ней паразитных мод, в частности для моды ТЕ_{32.8}, которая по расчётам может возбуждаться при пониженных напряжениях. В экспериментах, проведённых в Мэрилендском университете, наблюдался достаточно высокий уровень шумов в сигнале с детектора. Эти шумы вызваны, по-видимому, микропробоями при относительно невысоком вакууме (давление порядка 10^{-5} торр) вакууме в процессе «тренировки» лампы и дефектами внутренней поверхности тракта, возникшими в результате этих пробоев. Отметим, что в экспериментах, проведённых в ИПФ РАН, вакуум был примерно на порядок лучше. Поэтому уровень шумов был ниже и в основном обусловлен внешними наводками. Фотографии внутренней поверхности резонатора до и после экспериментов в Мэрилендском университете представлены на рис. 5.

Численное моделирование трансформации мод для специально оптимизированного профиля перехода от резонатора к коллектору свидетельствуют о том, что расчётное (не учитывающее погрешностей изготовления и дефектов, возникающих в процессе эксплуатации) содержание моды $TE_{31,8}$ в выходном излучении гиротрона составляет около 90%.

Для измерения энергии СВЧ импульса калориметрическим методом в Мэрилендском университете был разработан оригинальный жидкостный калориметр. В этом калориметре энергия терагерцового излучения поглощается жидкостью (гексан или этанол), что приводит к её термическому расширению. Это расширение вызывает изменение положения мениска в тонком капилляре. Калориметр калибруется разрядкой конденсатора с известной запасённой энергией через встроенный нагревательный элемент. Атмосфера и жидкость разделены тонкой тефлоновой плёнкой, обладающей достаточным коэффициентом пропускания на рабочей частоте гиротрона.



Рис. 6. Внешний вид калориметра (*a*) и его отклик на одиночный импульс с зарегистрированной энергией 0,56 Дж (б)

Материал	Увеличение расстояния	Длина	Мощность
резонатора	между катодом и резонатором	резонатора,	излучения
	от расчётного значения, мм	MM	кВт
Бериллиевая	1	4	100
бронза			
_ ,, _	1	6	130
Нержавеющая сталь			
с внутренним	1	6	150
медленным покрытием			
,	2	6	200

Таблица 1. Результаты экспериментов в ИПФ РАН

Изменение положения мениска в калориметре регистрируется с помощью видеокамеры и аналогоцифрового преобразователя. На рис. 6 показан внешний вид калориметра и результат типичного измерения энергии импульса микроволнового излучения. Калориметр устанавливался непосредственно за выходным окном гиротрона. В ходе экспериментов с резонатором с длиной прямого участка 3,85 мм была зарегистрирована мощность выходного излучения порядка 100 кВт.

Распределение мощности в узконаправленном волновом пучке было найдено в Мэрилендском университете при помощи тепловизора. В фокальной плоскости зеркала характерный диаметр пятна равен примерно 4 мм. В ИПФ РАН для фокусировки пучка в требуемый диаметр порядка 1 мм было использовано дополнительное короткофокусное зеркало, встречающее поток микроволнового излучения в фокальной плоскости первого собирающего зеркала. Именно с использованием такой схемы получен локализованный разряд в газовой среде, подробно описанный в работе [26].

Результаты экспериментов в ИПФ РАН сведены в табл. 1. Типичные осциллограммы импульсов тока, напряжения и сигнала с детектора, полученные в экспериментах в ИПФ РАН, представлены на рис. 7. Для измерения мощности использовался твёрдотельный калориметр, описанный в работе [27]. Первые эксперименты с использованием резонатора, аналогичного установленному в гиротрон Мэрилендского университета, дали очень близкое к измеренному там значение мощности микроволнового излучения. В процессе оптимизации режима генерации расстояние между катодом и резонатором было увеличено на 2 мм по сравнению с расчётным, что позволило снизить магнитное поле на катоде и, соответственно, увеличить сжатие электронного пучка и питч-фактор



Рис. 7. Типичные осциллограммы, полученные в экспериментах в ИПФ РАН: 1 — ускоряющее напряжение, 2 — ток электронного пучка, 3 — сигнал с детектора выходящего излучения



Рис. 8. Экспериментальная зависимость коэффициента прохождения терагерцового излучения $P_{\rm out}/P_{\rm in}$ через тефлоновый диск с толщиной 2 мм от частоты. Здесь $P_{\rm in}$ — мощность падающего излучения, слабо зависящая от частоты, $P_{\rm out}$ — мощность прошедшего через окно излучения

электронов. Максимальная мощность 210 кВт была получена при использовании резонатора из нержавеющей стали с длиной однородного участка 6 мм и с внутренним медным покрытием при напряжении и токе электронного пучка 58 кВ и 22 А соответственно. При этом КПД равен 16,5%. Максимальный КПД, равный 20%, был получен при напряжении 57 кВ и токе 16 А, когда мощность излучения составляла 160 кВт. Если принять во внимание пропускную способность 80 % использованного тефлонового окна с толщиной 2 мм (согласно результатам панорамных измерений, представленных на рис. 8, и укладывающуюся в диапазон значений, определяемый по теоретическим данным о свойствах тефлона [28, 29) и омические потери 9÷10% внутри гиротрона, то КПД генерации излучения в эксперименте близок к 30 %. Энергия в единичном импульсе

достигает 6,3 Дж, что согласуется с теоретическими оценками.

Определение эффективности работы квазиоптического преобразователя требует использования измерителя мощности, работающего «на проход», а не традиционного калориметра с внутренним коническим проводником. Как показывают первые эксперименты с использованием традиционного калориметра, мощность излучения на выходе гиротрона измеряется достаточно корректно, когда выходное излучение не является узким гауссовым пучком. В противном случае возможно его отражение и вывод из рабочего объёма калориметра, что приводит к занижению эффективности по отношению к расчётной. В результате измеренный коэффициент преобразования может равняться $50\div60\%$, а не $70\div80\%$, как следует из вычислений.



Рис. 9. Внешний вид экспериментальной установки в Мэрилендском университете: 1 — источники питания, 2 — гиротрон с преобразователем, 3 — плазменная камера. В правом верхнем углу приводится фотография СВЧ разряда на инициаторе при атмосферном давлении, полученная в ИПФ РАН

Сфокусированное СВЧ излучение было использовано для изучения терагерцового разряда при различных условиях. Сначала пробой был зарегистрирован в воздухе на мишени с инициаторами, установленными в фокусе параболического зеркала. Ими являлись острые (иголкоподобные) металлические частицы, размещённые на металлической подложке. Фотография СВЧ разряда на инициаторе пробоя приведена на рис. 9. В отличие от экспериментов в Мэрилендском университете на инициаторе наблюдались три пятна [17], и в настоящий момент авторы не могут дать однозначного объяснения данному явлению. Возможно, что пространственное распределение мощности в сфокусированном пучке имеет три небольших локальных максимума или трансформация мод на неоднородностях тракта существенно больше, чем в расчётах. Планируется продолжить экспериментальные исследования разряда и, в частности, зарегистрировать динамику его развития высокоскоростной камерой.

На следующей стадии экспериментов пробой наблюдался в камере, позволяющей контролировать состав и давление газа. Пробой наблюдался в аргоне в широком диапазоне давлений от 1 до 0,1 атмосферы. В ряде экспериментов зарегистрированы три области инициации, а в экспериментах с использованием дополнительного фокусирующего зеркала наблюдался разряд, локализованный в одной точке. Полученные результаты являются предварительными и требуют дополнительных исследований и построения детальной теоретической модели, учитывающей, в

М. Ю. Глявин, А. Г. Лучинин, А. А. Богдашов и др.

частности, тепловые эффекты. В настоящий момент продолжается исследование СВЧ разряда, инициированного терагерцовым излучением описанного гиротрона. Анализу первых полученных результатов посвящена отдельная статья [26] в данном выпуске журнала.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гиротроне с импульсным соленоидом была получена стабильная генерация излучения с частотой около 0,67 ТГц. Максимальная мощность СВЧ импульса с длительностью 30 мкс равна 210 кВт, а максимальный КПД составляет 20%. Энергия в единичном импульсе может достигать 6,3 Дж. Получен СВЧ разряд на металлическом инициаторе в воздухе и в аргоне при различных давлениях.

Дальнейшие эксперименты с гиротроном будут направлены на более точное измерение частоты генерации, оптимизацию квазиоптического преобразователя излучения гиротрона в волновой пучок, определение пространственной структуры излучения, достижение пробоя воздуха при атмосферном давлении с использованием дополнительных фокусирующих зеркал и изучение динамики газового разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Mueller E. R. // Industrial Physicist. 2003. V. 27. P. 29.
- 2. Siegel P. H. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2002. V. 50. P. 910.
- Зайцев Н. И., Панкратова Т. Б., Петелин М. И., Флягин В. А. // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19, № 5. С. 1056.
- 4. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press, 2004.
- 5. Booske J. H. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15, No. 5. Art. no. 055502.
- 6. Huang Z., Kim K.-J. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2007. V. 10. Art. no. 034801.
- 7. Bott I. B. // IEEE Proc. 1964. V. 52, No. 3. P. 330.
- Flyagin V. A., Luchinin A. G., Nusinovich G. S. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1983. V.4, No. 4. P. 629.
- Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. Y. // Phys. Rev. Lett. 2008. V.100. Art. no. 015101.
- Idehara T., Tsuchiya H., Watanabe O., et al. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2006. V. 27, No. 3. P. 319.
- 11. Bratman V. L., Kalynov Yu. K., Manuilov V. N. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. no. 245101.
- 12. Bratman V., Glyavin M., Idehara T., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. P. 36.
- 13. Granatstein V. L., Nusinovich G. S. // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. Art. no. 063304.
- Sidorov A. V., Bratman V. L., Glyavin M. Yu, et al. // IEEE Int. Conf. Pulsed Plasma and Plasma Sci., San Francisco, California, USA, June 16–21, 2013. Art. no. 10 E-4.
- Глявин М. Ю., Лучинин А. Г., Мануилов В. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 666.
- Pu R., Nusinovich G.S., Sinitsyn O.V., Antonsen T.M. // Phys. Plasmas. 2011. V.18. Art. no. 023107.
- Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Nusinovich G. S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. Art. no. 153503.
- Nusinovich G. S., Sprangle P., Romero-Talamas C. A., Granatstein V. L. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. Art. no. 083303.

- 19. Nusinovich G. S., Sprangle P., Semenov V. E., et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. Art. no. 124912.
- 20. Sakamoto K. // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 52. P. 145.
- 21. Vlasov S. N., Zagryadskaya L. I., Petelin M. I. // Radio Eng. Electron. Phys. 1975. V. 20. P. 14.
- Moiseev M. A., Nemirovskaya L. L., Zapevalov V. E., Zavolsky N. A. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. V. 18, No. 11. P. 2 117.
- 23. Botton M., Antonsen T. M., Levush B., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. V. 26. P. 882.
- 24. Kasparek W., Müller G. // Int. J. Electron. 1988. V. 64. P. 5.
- 25. Лучинин А. Г., Нусинович Г. С. // Гиротроны. Горький: ИПФАН, 1989. С. 55. Luchinin A., Nusinovich G. Gyrotrons. N. Novgorod, 1989. Р. 64.
- 26. Глявин М. Ю., Голубев С. В. Зорин В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 622.
- Belousov V. I., Oficerov M. M., Plachotnik V. Yu., Rodin Yu. V. // J. Comm. Tech. Electr. 1996. V.3. P.93.
- 28. http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_materials/.
- 29. Jin Y.-S., Kim G.-J., Jeon S.-G. // J. Korean Phys. Soc. 2006. V. 49. P. 513.

Поступила в редакцию 11 июня 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PULSED TERAHERTZ GYROTRON WITH RECORD-BREAKING POWER AND EFFICIENCY PARAMETERS

M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, A. A. Bogdashov, V. N. Manuilov, M. V. Morozkin, Yu. Rodin,

G. G. Denisov, D. Kashin, G. Rogers, C. A. Romero-Talamas, R. Pu, A. G. Shkvarunetz, and G. S. Nusinovich

We describe the results of studying experimentally a high-power (hundreds of kilowatts) pulsed (pulse duration of about 30 μ s subterahertz gyrotron with the generation frequency corresponding to one of the atmosphere transparence windows. The gyrotron with an operating frequency of 0.67 THz, a power of more than 200 kW and an efficiency of 20–25% was used in the experiments on ignition of a localized discharge in plasma. The paper presents the data about measurements of the temperature field of the emitter, calorimetric measurements of the power and efficiency of the gyrotron, and the design of the quasioptical converter of radiation to a narrowly directed wave beam. The first experiments with the terahertz discharge in a focused wave beam of the gyrotron are briefly described.