

УДК 621.385.6

РАЗРАБОТКА МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ГИРОТРОНА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. Ю. Глявин^{1,2}, *А. Г. Лучинин*¹, *В. Н. Мануилов*^{1,2}, *М. В. Морозкин*¹,
*А. А. Богдашов*¹, *И. Г. Гачев*¹, *А. С. Седов*¹, *Р. Пу*³,
*Г. С. Нусинович*³, *В. Л. Гранатштейн*³

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

³ Центр прикладных исследований в области электромагнетизма, Мэрилендский университет, США

Описаны основные этапы разработки гиротрона субтерагерцового диапазона частот с мощностью несколько сотен киловатт, длительностями импульсов выходного излучения порядка 10 нс и частотой генерации, соответствующей одному из окон прозрачности атмосферы. Гиротрон с рабочей частотой 0,67 ТГц и мощностью 200÷300 кВт при фокальном диаметре выходного луча 1÷2 мм может быть использован для регистрации источников ионизирующего излучения с расстояния в несколько десятков метров. Принцип регистрации основан на возникновении сверхвысокого частотного разряда в фокальном пятне, если число свободных электронов на 1÷2 порядка превышает естественный фон. Рассчитана и оптимизирована электронно-оптическая система такого гиротрона. Для электронного пучка, формируемого данной системой, проведён анализ сценария включения гиротрона и показана возможность устойчивой одномодовой генерации на моде TE_{31,8}. Представлены результаты анализа тепловых нагрузок, демонстрирующие их приемлемый уровень в резонаторе и коллекторе лампы при длительности импульсов порядка 10 нс.

ВВЕДЕНИЕ

Создание генераторов мощного излучения терагерцового диапазона частот представляет интерес для многочисленных приложений, см., например, [1–4]. Одним из них является дистанционное обнаружение скрытых радиоактивных источников [5, 6]. Наиболее перспективным генератором излучения терагерцовой спектральной области для этого приложения является гиротрон, который на несколько порядков превосходит по мощности традиционные лампы обратной волны и полупроводниковые источники, а его стоимость, габариты и рабочие напряжения значительно ниже, чем у лазеров на свободных электронах. Технологии реализации сверхсильных импульсных магнитных полей позволяют создавать мощные гиротроны субтерагерцового диапазона частот с длительностями импульсов несколько десятков микросекунд. С целью уменьшения энергоёмкости соленоида для гиротронов с импульсным магнитным полем должны иметь как можно меньший размер, ограниченный лишь условием его достаточности для размещения электродинамической системы прибора. Миниатюризация проходного отверстия соленоида и желание сохранить симметрию конструктивных узлов приводит к необходимости использовать внешние преобразователи излучения в узконаправленные волновые пучки, что является отличительной особенностью гиротронов с импульсным магнитным полем. Другой существенной трудностью для разработчиков таких приборов является резкая компрессия и декомпрессия электронного пучка, вызванная небольшими размерами соленоида, и, как следствие, неадиабатичность электронно-оптической системы формирования электронного пучка. Наконец, сложность представляет само создание сильного магнитного поля и обеспечение прохождения переменного магнитного поля через металлический корпус прибора.

В статье анализируются требования к источнику электромагнитного поля сверхвысокой частоты (СВЧ), позволяющему регистрировать наличие ионизирующих излучений с достаточно большого расстояния в несколько десятков метров, см. раздел 1, и пути решения перечисленных выше проблем, возникающие при реализации подобного источника на основе гиротрона. В разделе 2 описаны особенности электронно-оптической системы гиротрона субтерагерцового диапазона частот, позволяющей сформировать трубчатый электронный пучок с малым разбросом скоростей, радиусов R ведущих центров орбит электронов и высокой долей энергии вращения электронов, что позволяет рассчитывать на достижение относительно высокого коэффициента полезного действия (КПД). В разделе 3 рассмотрен сценарий включения гиротрона и приводятся результаты расчёта его КПД и выходной мощности. Раздел 4 посвящён оценке тепловых нагрузок на элементы конструкции. Результаты экспериментального исследования магнитной системы представлены в разделе 5. В заключении сформулированы основные результаты выполненных расчётов.

1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ГЕНЕРАТОРУ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. Принцип дистанционной регистрации

Недавно была высказана идея о возможности использовать мощное электромагнитное поле микроволновой спектральной области для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения [6]. Она заключается в том, что если сфокусировать мощное электромагнитное поле в достаточно малую область, можно реализовать условия, когда его амплитуда превысит пробойное значение. Наличие в области локализации поля свободного электрона приведёт в этом случае к возникновению СВЧ разряда. Терагерцовый частотный диапазон выделен тем, что электромагнитное поле с лежащей в нём частотой можно сфокусировать в достаточно малую область, характерный размер которой определяется длиной волны, вероятность появления в которой свободных электронов, необходимых для инициации СВЧ разряда, при естественном ионизационном фоне пренебрежимо мала. В этой ситуации возникновение разряда будет служить индикатором появления источников ионизирующего излучения. Поскольку при достаточно длинном импульсе вероятность достижения свободным электроном области локализации СВЧ поля повышается, существует ограничение на длительность СВЧ импульса. Для простейших моделей это время достаточно легко оценить, но для более реалистичных моделей проблема существенно усложняется. Это отличает рассматриваемую ситуацию от разрядов в сфокусированных пучках более низкочастотного электромагнитного поля, когда в фокальном пятне практически всегда присутствуют свободные электроны, или разрядов, инициируемых излучением оптического диапазона, когда использование мощных лазеров допускает многофотонную ионизацию нейтральных атомов в отсутствие свободных электронов в исходном состоянии.

1.2. Требования к источнику СВЧ излучения

Как уже отмечалось, для ряда приложений могут быть востребованы источники излучения терагерцового диапазона частот с мощностью в десятки и даже сотни киловатт. Таким образом, повышение мощности существующих генераторов этой спектральной области актуально не только с общефизической, но и с практической точки зрения. В частности, для превышения амплитудой электромагнитного поля пороговых значений возникновения разряда излучение с мощностью

свыше 100 кВт должно быть сфокусировано в апертуру с характерным диаметром порядка 1 мм. При выборе частоты излучения естественно ориентироваться на одно из окон прозрачности атмосферы с целью минимизировать потери при прохождении СВЧ пучка от выходного окна лампы до области его фокусировки. Исходя из желания иметь достаточно высокую частоту излучения, т.е. достаточно малый объём сфокусированного поля, и приемлемые потери при транспортировке от источника излучения до исследуемого объекта, была выбрана частота 0,67 ТГц, характерные потери на которой в воздухе составляют примерно 50 дБ/км. Важно отметить, что существует некоторая характерная длительность СВЧ импульса, при которой разряд инициируется не за счёт диффузии в объём локализации поля свободных электронов естественного фона, а за счёт свободных электронов, возникших в результате наличия источника ионизирующего излучения. Для указанного размера области локализации эта длительность примерно равна 10 нс. Исходя из оценок условий возникновения разряда, детально изложенных в работах [7, 8], ограничимся утверждением, что при помощи гиротрона с рабочей частотой 0,67 ТГц, мощностью 200 кВт при условии фокусировки излучения в фокальное пятно с диаметром 1 мм можно дистанционно регистрировать источники излучения, создающие число свободных электронов, более чем в 20 раз превышающее естественный фон, с расстояния в 20÷30 метров [8].

1.3. Существующий задел

Первые успешные эксперименты с гиротронами субтерагерцового частотного диапазона на базе импульсных соленоидов были описаны в [9]. В диапазоне частот 0,3÷0,7 ТГц при длительностях импульсов порядка 50 нс была получена мощность порядка 100 кВт, а именно на частоте 0,33 ТГц — 130 кВт, на частоте 0,65 ТГц — 40 кВт. Позднее, в 2006–2009 годах, усовершенствование импульсных соленоидов позволило достичь частоты генерации выше 1 ТГц при киловаттном уровне выходной мощности в условиях резонанса с основной циклотронной гармоникой [10], что существенно упрощает проблему селекции мод и, в перспективе, позволяет обеспечить высокую мощность генерируемого излучения. Возможность устойчивого возбуждения одной рабочей моды высокого порядка была продемонстрирована в гиротронах непрерывного действия с мегаваттным уровнем мощности и с рабочими частотами 170 ГГц, разрабатываемых для токамака ITER [25]. Приемлемые омические потери и, как следствие, высокая эффективность возбуждения были продемонстрированы, в частности, на моде $TE_{31,8}$ [19, 20], что делает её одним из возможных типов колебаний для мощного гиротрона субтерагерцового диапазона частот.

Таким образом, для регистрации источников ионизирующего излучения необходимо разработать гиротрон с выходной мощностью в 200÷300 кВт, длительностью импульсов 10 нс и рабочей частотой 0,67 ТГц. Основные элементы соответствующего гиротрона и магнитной системы описаны в следующих разделах.

2. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГИРОТРОНА СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА БАЗЕ ИМПУЛЬСНОГО СОЛЕНОИДА

Переход от миллиметрового диапазона длин волн в субмиллиметровый предъявляет ряд специфических требований к электронно-оптической системе гиротрона. Как известно, наиболее важными параметрами винтового электронного пучка являются средний питч-фактор g , т.е. отношение скорости вращения электронов к скорости их поступательного движения, увеличение которого приводит к росту КПД гиротрона, и разброс скоростей вращения электронов δv_{\perp} . Предельный достижимый питч-фактор определяется требованием устойчивости электронного пучка.

Наиболее важным фактором, ограничивающим g , оказывается потеря устойчивости винтового электронного пучка, вызванная отражением части электронов с наибольшими осцилляторными скоростями от магнитного зеркала и последующим их захватом в адиабатическую ловушку между катодом и входом в резонатор. Очевидно, вероятность такого захвата быстро возрастает по мере увеличения разброса их скоростей. Поэтому максимальное значение питч-фактора оказывается напрямую связано с проблемой минимизации разброса скоростей. Элементарные оценки показывают, что предельная величина g не должна превышать согласно [11]

$$g_{\max} = \frac{1}{\sqrt{k \delta v_{\perp}}}, \quad (1)$$

где эмпирический коэффициент $k \approx 1,0 \div 1,5$. Разброс скоростей вращения электронов в винтовом электронном пучке вызван целым рядом причин, в частности возможным нарушением аксиальной симметрии, наличием позиционного разброса скоростей за счёт различия точек вылета электронов с эмиттера конечной ширины, неадиабатическими полями в переходной области между пушкой и резонатором, азимутальной неоднородностью эмиссии, шероховатостями эмиттера и, наконец, полем пространственного заряда пучка, определяющим парциальный разброс скоростей $\delta v_{\perp\rho}$ [12].

Влияние части причин может быть ослаблено путём юстировки электронно-оптической системы, применением определённой технологии изготовления эмиттера и оптимизацией формы электродов магнетронно-инжекторной пушки. Однако, по мере укорочения длины волны выходного излучения электронные траектории становятся всё более мелкомасштабными, что приводит к увеличению роли шероховатостей эмиттера. При работе в субтерагерцовом диапазоне частот вклад, вносимый этим фактором, как правило, превышает возмущение распределения скоростей, вносимое полем пространственного заряда пучка. Парциальный разброс скоростей, вызванный шероховатостью эмиттера, может быть оценён из соотношения [13]:

$$\delta v_{\perp\text{rh}} = 1,6 \sqrt{\left(1 + \frac{\pi^2}{4} \text{tg}^2 \varphi\right) \frac{r_0}{h}}. \quad (2)$$

Здесь r_0 — размер шероховатости, h — высота подъёма электронов над эмиттером, φ — угол наклона магнитного поля к поверхности эмиттера.

Предварительные оценки КПД гиротрона показывают, что для достижения требуемой мощности в сотни киловатт необходимы значения рабочего тока 15 А и напряжения электронного пучка $U_0 = 70$ кВ, питч-фактор $g \approx 1,2$, а позиционный разброс радиусов ведущих центров электронных орбит в резонаторе не должен превышать 0,3 от длины волны излучения. Согласно выводам работы [14], вплоть до указанной величины позиционного разброса его негативное влияние не слишком существенно и уменьшение КПД составляет не более 10 % от максимального возможного значения. Радиус электронного пучка в резонаторе $R_0 = 2,3$ мм обеспечивает наиболее благоприятные условия для возбуждения моды $\text{TE}_{31,8}$ на частоте 0,67 ТГц при радиусе резонатора $R_p = 4,54$ мм. Форма электродов электронно-оптической системы и электронные траектории изображены на рис. 1.

Основными особенностями рассматриваемой электронно-оптической системы являются:

1) непараксиальность магнитного поля, что существенно снижает достоверность расчёта параметров магнетронно-инжекторной пушки, проводимого на основе адиабатической теории [15] и обычно используемого для предварительных оценок;

2) большой зазор между катодом и анодом H ($H/R_c \sim 1,8$, где R_c — радиус катода) в диодном варианте пушки, что усложняет процесс минимизации позиционного парциального разброса скоростей;

3) большое отношение рабочего тока магнетронно-инжекторной пушки к ленгмюровскому току ($I/I_L \sim 0,2$), что увеличивает зависимость питч-фактора и разброса скоростей от тока пучка;

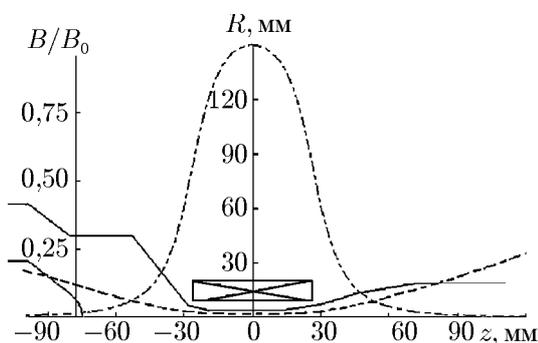


Рис. 1. Общий вид магнитной и электродинамической систем гиротрона, продольное распределение магнитного поля (штрих-пунктир) и траектории ведущих центров орбит электронов (пунктир); $B_0 = 27,522$ Тл, $U_0 = 70$ кВ, $R_0 = 2,3$ мм

лампы или из-за теплового смещения элементов конструкции, не приводит к значительному изменению параметров электронного пучка: при сдвиге катода на 1 мм к резонатору при том же токе пучка $I = 15$ А величина $g = 1,27$ и $\delta v_{\perp} = 0,09$; при сдвиге катода на 1 мм от резонатора — $g = 1,26$, $\delta v_{\perp} = 0,05$. Параметры электронного пучка при описанной выше геометрии электродов, с незначительными вариациями области вблизи эмиттера, дополнительно исследовалась численными кодами EGN2W и MICHELLE [16]. Все результаты численного моделирования дают близкие значения разброса скоростей около 10 % и питч-фактора 1,1–1,3 в пренебрежении шероховатостями эмиттера. «Провисание» потенциала в резонаторе составляет величину около 1,7 кВ и не оказывает существенного влияния на работу электронно-оптической системы.

Как отмечалось выше, для гиротронов коротковолновой спектральной области шероховатости катодной поверхности играют весьма существенную роль при формировании электронного потока. Подставляя в формулу (2) угол φ наклона магнитного поля к поверхности эмиттера и высоту h подъема электронов в пушке, легко оценить разброс скоростей электронов для разных размеров шероховатостей r_0 : при размерах шероховатостей 10 мкм разброс скоростей $\delta v_{\perp} = 0,36$, а при размерах шероховатостей 20 мкм — $\delta v_{\perp} = 0,50$. Численное моделирование проводилось для умеренных размеров шероховатости 10 мкм. Расчёты показывают, что функция распределения электронов по скоростям остаётся унимодальной и близкой к гауссовой вплоть до максимального рабочего тока пучка 15 А. Однако необходимо отметить очень большую величину R_{ref} коэффициента отражения пучка от магнитного зеркала, достигающую 0,05 при токе около 10 А. В то же время результаты теоретического анализа переходных процессов в магнетронно-инжекторных пушках гиротронов, а также ряд экспериментальных измерений параметров винтового электронного пучка [17, 18] показывают, что для обеспечения его устойчивости желательно ограничить величину R_{ref} на уровне 0,02–0,03. Для этого необходима технология изготовления эмиттера, при которой размеры его шероховатостей существенно не превышают 2 мкм. Для предварительных испытаний был изготовлен катод из LaB₆, эмиссионные свойства которого допускают кратковременное ухудшение вакуума и подъём давления вплоть до атмосферного, что позволяет в разборной лампе заменить отдельные узлы и, например оптимизировать длину и профиль резонатора, не меняя катодный узел. В процессе измерения характеристик катода зафиксировано практически однородное (максимальная разность температур около 20 °С) распределение температуры по

4) большая ширина эмиттера L в масштабе высоты подъёма электронов h ($L/h \approx 10$), что приводит к неоднородной экранировке электрического поля на эмиттере кулоновским полем пучка с соответствующим падением питч-фактора и возрастанием разброса скоростей.

Численная оптимизация формы электродов при радиусе катода 22 мм, выполненная на базе методов, описанных в [11], позволила получить следующие параметры электронного потока в модели, не учитывающей шероховатости эмиттера: при токе пучка $I = 15$ А величина $g = 1,27$ и $\delta v_{\perp} = 0,09$. Сдвиг катода вдоль оси лампы, возможный в силу варьирования радиуса электронного пучка в резонаторе в разборном варианте

поверхности эмиттера и достижение необходимой температуры 1500°C при мощности накального источника около 500 Вт, которая составляет примерно 70 % от максимальной возможной.

3. РАСЧЁТ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИРОТРОНА И АНАЛИЗ СЦЕНАРИЯ УСТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ГЕНЕРАЦИИ

Рабочая мода гиротрона была выбрана после анализа спектра собственных мод круглого волновода с учётом имеющихся экспериментальных данных. При исследовании режима генерации рабочей моды $TE_{31,8}$ (см. рис. 2) и анализе сценария возбуждения колебаний (см. рис. 3) рассматривался цилиндрический резонатор круглого сечения с закритическим катодным сужением с углом 4° и выходным расширением с углом $2,5^\circ$, за которым располагался плавный переход, профиль которого оптимизировался с целью минимизации трансформации рабочей моды. Согласно расчётам в разработанном выходном переходе потери мощности рабочей моды на переизлучение в другие моды составляют величину, примерно равную 0,05.

Сценарий включения гиротрона и его выхода на рабочий режим определяется переходными процессами на фронте импульса ускоряющего напряжения. Анализ стартовых токов и решение самосогласованной системы уравнений, состоящей из уравнения движения электронов и уравнений, описывающих изменение амплитуды и фазы взаимодействующих мод, свидетельствует, что с учётом изменения пичч-фактора на фронте импульса при напряжении меньше 40 кВ стартовые токи для генерации рабочей и паразитных мод больше рабочего тока пучка, вычисленного по вольт-амперной характеристике. Исходя из этого расчёт сценария возбуждения был проведён от напряжения 40 кВ до рабочего напряжения 70 кВ с шагом 5 кВ. При каждом значении напряжения расчёт проводился до установления стационарного режима генерации, при переходе к следующему значению напряжения стационарные амплитуды мод задавались в качестве начальных условий, а значения пичч-фактора, разброса скоростей и соответствующие безразмерные параметры самосогласованной системы уравнений пересчитывались на соответствующее значение напряжения. Оставляя за рамками данной статьи расчёт вольт-амперной характеристики, представляющий отдельную, достаточно интересную задачу, которую планируется изложить в рамках отдельной работы, отметим лишь, что она состоит из двух участков, соответствующих режимам ограничения тока пространственным зарядом при малых анодных напряжениях, где параметры электронного пучка определялись аналитически, и температурного ограничения эмиссии при больших напряжениях, где параметры пучка рассчитывались с помощью программы численного моделирования EPOS [11]. В качестве параметров электронного пучка при рабочем напряжении 70 кВ использовались значения, полученные при численном моделировании электронно-оптической системы. Отметим, что при повышении напряжения от 20 до 70 кВ, соответствующих работе катода в режиме температурного ограничения тока эмиссии, ток пучка в анализируемой магнетронно-инжекторной пушке увеличивается за счёт эффекта Шоттки только на 0,5 А. Анализ стартовых токов показывает, что наименьшим стартовым током при рабочем магнитном поле 26,5 Тл обладает мода $TE_{30,9}$, однако численное моделирование с учётом взаимодействия мод в

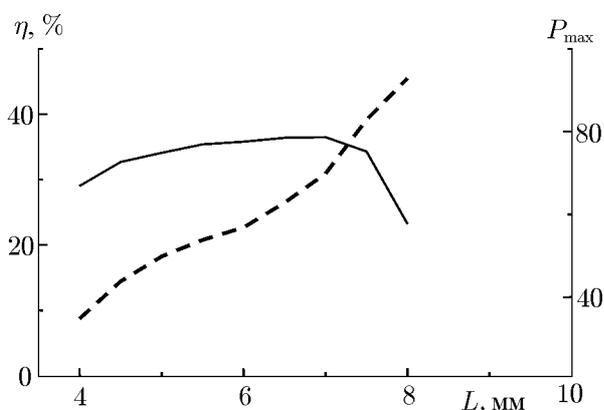


Рис. 2. Зависимость выходного КПД η (сплошная линия) и максимальной плотности мощности P_{\max} на стенке резонатора (пунктирная линия) в зависимости от длины цилиндрической части L

многомодовом резонаторе [21] показало, что в процессе конкуренции возбуждается мода $TE_{32,8}$, которая подавляет возбуждение других мод. При увеличении напряжения до 60 кВ наступает срыв колебаний указанной моды и возбуждение рабочей моды $TE_{31,8}$, см. рис. 3.

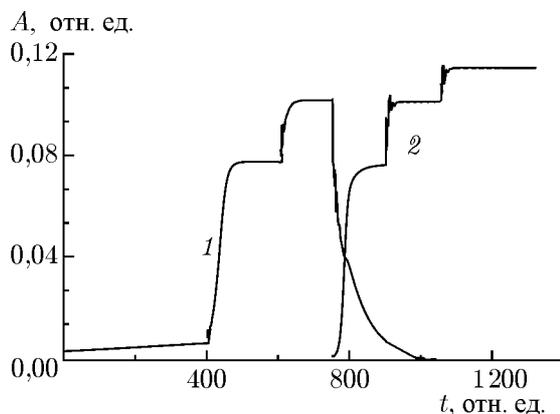


Рис. 3. Сценарий установления рабочего режима генерации на фронте импульса ускоряющего напряжения. A — амплитуда моды, рабочая частота гиротрона 670 ГГц, $L = 5$ мм, 1 отн. ед. времени равна $1/13$ нс, кривая 1 относится к моде $TE_{32,8}$, 2 — к моде $TE_{31,8}$. Горизонтальные участки кривой 1 соответствуют (слева направо) ускоряющим напряжениям 45, 50 и 55 кВ, на кривой 2 — 60, 65 и 70 кВ

Резонатор оптимизировался по длине цилиндрической части с целью достижения максимального КПД при следующих параметрах электронного пучка: ускоряющее напряжение 70 кВ, ток пучка 15 А, питч-фактор 1,3, разброс скоростей 0,3. Максимальный электронный КПД, т. е. КПД гиротрона без учёта омических потерь, согласно оценке составляющих менее 10 % от полезных дифракционных потерь и потерь на преобразование рабочей моды в узконаправленный волновой пучок, $\eta_{\max} = 0,36$ достигался при длине цилиндрической части резонатора $L = 7$ мм, см. рис. 2. Однако при такой величине L существенно возрастали омические потери. При этом представляется целесообразным ограничить длину однородного участка величиной $4 \div 5$ мм, т. к. в этой области параметров КПД мало отличается от η_{\max} , а омические потери малы. Расчёты показали, что оптимальная длина слабо зависит от питч-фактора и даже при его снижении до 1,1 КПД гиротрона может достигать 32 % [22].

4. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ

Определение максимальной допустимой длительности импульса, определяемой тепловыми нагрузками в резонаторе и коллекторе, выполнялось с помощью программы ELCUT [23]. Согласно оценкам [6–8], гиротрон будет работать в режиме генерации с длительностью импульса 10 мкс. Поскольку гиротрон работает в режиме разовых импульсов, а соленоид, корпус гиротрона из нержавеющей стали и его коллектор охлаждаются жидким азотом, в качестве начальной температуры конструкционных узлов была выбрана температура жидкого азота (T_N). Для того, чтобы увеличить площадь токооседания, коллектор гиротрона выполняется в виде конуса из тугоплавкого материала (молибден) со средним радиусом 10 мм, образующая которого составляет угол около 5° с силовой линией магнитного поля. Расчёт электронных траекторий даёт длину следа на коллекторе около 8 мм, при этом распределение нагрузки является достаточно равномерным, см. рис. 4. Нестационарная задача для определения максимального значения температуры коллектора и резонатора в импульсном режиме работы гиротрона решалась при длительности импульса τ до 50 мкс. Оценить температуру T при более коротких импульсах можно полагая $T \propto \sqrt{\tau}$.

Результаты соответствующих расчётов представлены на рис. 5. Полученные значения максимальной температуры в режиме разовых импульсов не превышают значений, допускающих долговременную работу прибора в циклическом режиме нагрев—охлаждение и расширение—сжатие без разрушения его конструктивных элементов [26], в т. ч. и при отсутствии генерации, когда вся энергия пучка выделяется на коллекторе.

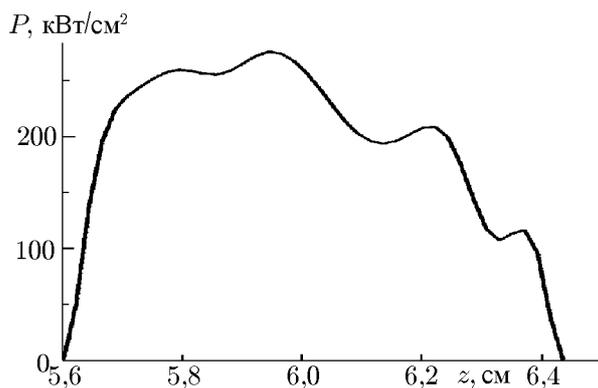


Рис. 4. Распределение плотности мощности P вдоль коллектора. Координата z отсчитывается от центра резонатора

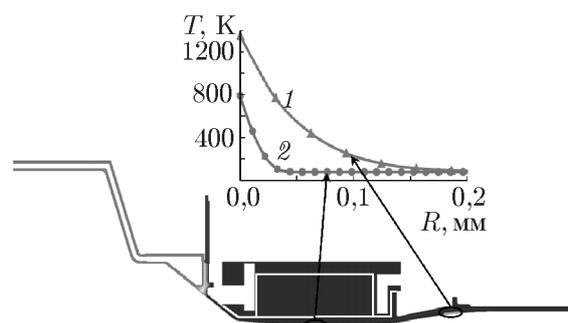


Рис. 5. Распределение температуры по радиальной координате для резонатора и коллектора; $z = 0$ — центр резонатора, см. рис. 1, кривая 1 отвечает коллектору, расположенному при $z = 85$ мм, кривая 2 — резонатору

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО СОЛЕНОИДА

Как хорошо известно, проблема селективного возбуждения рабочей моды упрощается при работе на основной гармонике гирочастоты. В подавляющем большинстве случаев выбор высших гармоник вызван невозможностью создания магнитных полей, достаточно сильных для работы на основном циклотронном резонансе. Современные криомагнитные системы позволяют создавать поля до 20 Тл, а гибридные магнитные системы громоздки и энергоёмки. Таким образом, практически безальтернативным методом создания магнитного поля 27÷28 Тл, требуемого для работы на основном циклотронном резонансе, является использование импульсных соленоидов.

Для уменьшения энергии магнитного поля провод наматывался непосредственно на корпус лампы и использовалось охлаждение жидким азотом, что позволяло получить дополнительную

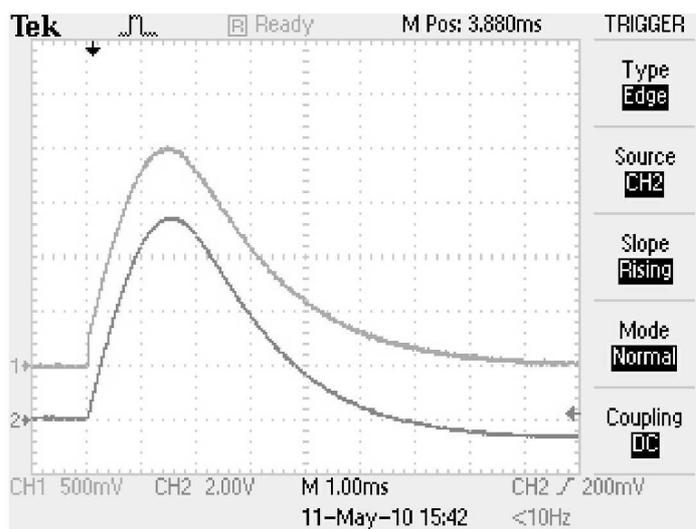


Рис. 6. Корпус гиротрона с намотанным соленоидом и осциллограммы импульса тока через соленоид, полученная с помощью шунта 75 мВ/300 А (верхняя кривая) и пояса Роговского 1 В/1 кА (нижняя кривая)

термостабилизацию конструкции и снижение омических потерь. Механическая прочность обеспечивалась заливкой обмотки эпоксидными компаундами и установкой внешнего бандажа из стекловолокна. Проходной диаметр рабочего отверстия соленоида, намотанного медным проводом, составлял 14 мм, корпус имел стенки из нержавеющей стали с толщиной 1 мм. Измеренная индуктивность составила 320 мкГн при постоянной соленоида 3,5 Тл/кА. Постоянная соленоида определялась при постоянном токе величиной около 10 А датчиком Холла. В испытаниях прототипа соленоида в режиме разовых импульсов (1 импульс в 3 минуты) при токе 8 кА было получено магнитное поле 28 Тл [24]. Следует отметить незначительный расход хладагента: 3-х литров жидкого азота было достаточно для нескольких десятков импульсов. Фотография корпуса гиротрона с намотанным соленоидом и осциллограмма импульса тока соленоида представлены на рис. 6.

В настоящий момент изготовлены основные узлы гиротрона. Начало экспериментального исследования прибора планируется на ноябрь–декабрь 2011 года.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчёты показывают возможность реализации гиротрона с мощностью 100÷200 кВт, рабочей частотой 670 ГГц и эффективностью 25÷30 %. Данный гиротрон планируется использовать для дистанционного (с расстояния 20÷50 метров) обнаружения источников ионизирующего излучения. Успешно испытан соленоид с магнитным полем 27÷28 Тл, работающий в режиме разовых импульсов, с внутренним объёмом, достаточным для размещения электродинамической системы гиротрона с указанной рабочей частотой.

Соавторы данной статьи, являющиеся сотрудниками ИПФ РАН, глубоко признательны Н. А. Завольскому за предоставленную возможность использовать разработанное им программное обеспечение для численного моделирования динамики переходных процессов в гиротроне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mueller E. R. // *The Industrial Physicist*. 2003. V. 9. P. 27.
2. Siegel P. H. // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2002. V. 50. P. 910.
3. Griffin R. // *Int. Conf. IRMMW-THz 2008, Pasadena, USA*. P. F1P2.
4. Idehara T., Ogawa I., Saito T., et al. // *Terahertz Science and Technology*. 2008. V. 1, No. 2. P. 100.
5. Granatstein V. L., Nusinovich G. S. // *Bulletin of the APS*. 2009. V. 54, No. 15. APS-DPP Meeting, Atlanta, Georgia. P. BO6 2.
6. Granatstein V. L., Nusinovich G. S. // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 108. Art. no. 063304.
7. Nusinovich G. S., Pu R., Antonsen T. M., et al. // *Int. J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 2011. V. 32, No. 3. P. 380.
8. Nusinovich G. S., Sprangle P., Romero-Talamas C. A., Granatstein V. L. // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. Art. no. 083303.
9. Flyagin V. A., Luchinin A. G., Nusinovich G. S. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 1983. V. 4. P. 629.
10. Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. Yu. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. Art. no. 015101.
11. Krivosheev P., Lygin V., Manuilov V., Tsimring Sh. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 2001. V. 22, No. 8. P. 1119.

12. Гольденберг А. Л., Лыгин В. К., Мануилов В. Н. и др. // Гиротрон. Горький, 1981. С. 86.
13. Tsimring Sh. E. Electron beams and microwave vacuum electronics. Wiley-Interscience, 2006. 599 p.
14. Pu R., Nusinovich G., Antonsen T. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. Art. no. 083105.
15. Гольденберг А. Л., Панкратова Т. Б. // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1971. Т. 9. С. 81.
16. Kesar A. S., Pu R., Nusinovich G. S., Granatstein V. L. // 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Chicago, Illinois, 2010. P. GO7.00006.
17. Запевалов В. Е., Куфтин А. Н., Лыгин В. К. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 9. С. 773.
18. Glyavin M. Yu., Goldenberg A. L., Kuftin A. N., et al. // IEEE Trans. n Plasma Sci. 1999. V. 27, No. 2. P. 474.
19. Sakamoto K., Kasugai A., Takahashi K., et al. // Nature Physics. 2007. V. 3. P. 411.
20. Sakamoto K., Kasugai A., Kajiwara K., et al. // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. Art. no. 095019.
21. Глявин М. Ю., Запевалов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 9. С. 1176.
22. Pu R., Nusinovich G. S., Sinitzyn O. V., Antonsen T. M. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. Art. no. 023107.
23. <http://elcut.ru>.
24. Glyavin M. Yu., Zhurin K. A., Kopelovich E. A., et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2011. V. 54, No. 1. P. 77.
25. Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Update 2010: KIT scientific reports No. 7575.
26. Казарновский Д. М. Радиотехнические материалы. М.: Высшая школа, 1972. 312 с.

Поступила в редакцию 7 июля 2011 г.; принята в печать 16 сентября 2011 г.

DEVELOPMENT OF A HIGH-POWER PULSED SUBTERAHERTZ GYROTRON FOR REMOTE DETECTION OF SOURCES OF IONIZING RADIATION

M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, V. N. Manuilov, M. V. Morozkin, A. A. Bogdashov, I. G. Gachev, A. S. Sedov, P. Pu, G. S. Nusinovich, and V. L. Granatshtein

We describe the main stages of the development of a gyrotron in the sub-terahertz band with a power of several hundreds of kilowatts, duration of the output radiation pulses of about 10 μ s, and the generation frequency corresponding to an atmospheric transparency window. The gyrotron having a working frequency of 0.67 THz, a power of 200–300 kW, and the focal diameter of the output beam 1–2 mm can be used to register sources of ionizing radiation from the distance of several tens of meters. The registration principle is based on the appearance of a microwave frequency discharge in the focal spot, if the number of free electrons exceed the natural background by 1–2 orders of magnitude. The electron-optical system of such a gyrotron has been calculated and optimized. The scenario of the gyrotron switching on has been analyzed for the electron beam formed in such a system, and the possibility of stable single-mode generation on the TE_{31,8} mode is demonstrated. The results of analysis of thermal loads, which demonstrate their acceptable level in the cavity and the tube cavity for pulse durations of about 10 μ s are presented.