

Сильноточный релятивистский гиротрон Ка-диапазона с компрессией пучка в электронно-оптической системе

Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, А.Н. Леонтьев, К.В. Минеев, Р.М. Розенталь

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

Аннотация: Представлены результаты первых экспериментальных исследований сильноточного гиротрона Ка-диапазона с электронно-оптической системой с магнитной компрессией. Получена генерация излучения мощностью 35-40 МВт на модах $TE_{3,2}$ и $TE_{4,2}$ с частотой 30,6 и 35,2 ГГц соответственно.

Ключевые слова: релятивистский гиротрон, сильноточные пучки, миллиметровое излучение

1. Введение

В настоящее время ведется значительное число исследований, направленных на создание источников миллиметрового излучения большой мощности на основе сильноточных релятивистских электронных потоков, формируемых взрывоэмиссионными катодами. Подавляющее большинство работ при этом посвящено приборам с прямолинейными пучками электронов, взаимодействующими с замедленными волнами. Вместе с тем, с точки зрения получения миллиметрового излучения большой мощности, существенным потенциалом обладают гиротроны, основанные на взаимодействии винтовых электронных потоков с незамедленными волнами. Важным преимуществом гиротронов является отсутствие мелкомасштабных по сравнению с рабочей длиной волны элементов электродинамической системы, а также низкая чувствительность к начальному скоростному разбросу частиц. В настоящей работе представлены первые результаты экспериментальных исследований сильноточного гиротрона Ка-диапазона, разрабатываемого в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН.

2. Устройство электронно-оптической системы гиротрона

Одной из ключевых задач при создании гиротронов является разработка электронно-оптической системы (ЭОС), формирующей винтовой электронный поток. Для исследуемого гиротрона разработана ЭОС, в которой раскачка пучка кикером осуществляется в относительно слабом поле, после чего магнитное поле нарастает до рабочих значений. В результате, на участке компрессии происходит одновременное сжатие пучка и увеличение его осцилляторной скорости, по аналогии с традиционными магнетронно-инжекторными пушками слаботочных гиротронов.

Для создания магнитного поля заданной конфигурации используется эффект экранировки проводящей оболочкой импульсного магнитного поля. В оптимизированном варианте системы ослабление ведущего магнитного поля осуществлялось медным цилиндрическим экраном длиной 90 мм, внутренним радиусом 25,5 мм и толщиной 3 мм. Такой экран при длительности полупериода импульса поля около 5 нс, соответствующей используемому соленоиду и емкостному накопителю источника питания, обеспечивает ослабление поля приблизительно в два раза на достаточно протяженном участке. В свою очередь прямолинейный электронный пучок с энергией 500 кэВ, инжектируемый катодом, приобретает питч-фактор около 1,0.

Схематическое устройство ЭОС и гиротрона представлено на рисунке 1.

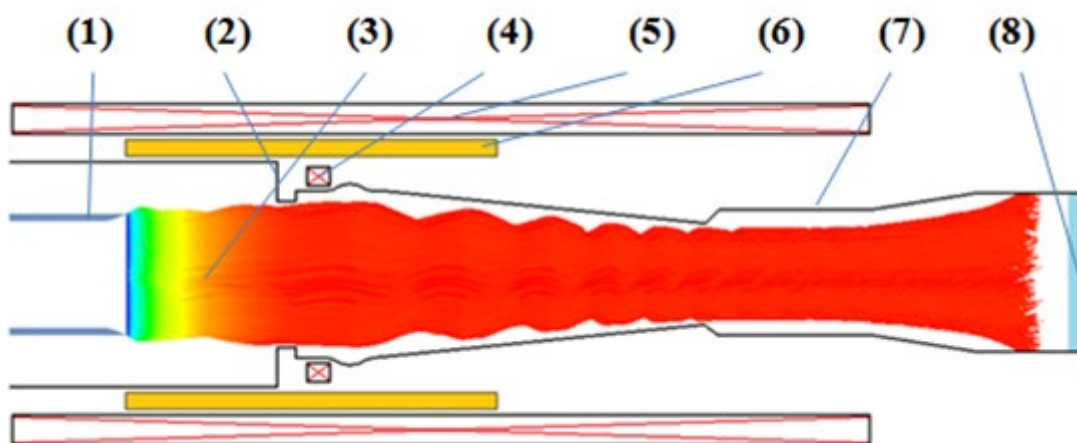


Рисунок 1. Схема гиротрона: 1 – катод, 2 – анод, 3 – электронный пучок, 4 – кикер, 5 – соленоид, 6 – проводящая оболочка, 7 – резонатор гиротрона, 8 – выходное вакуумное окно.

На основе выполненных расчетов были изготовлены элементы ЭОС (рисунок 2а) и выполнены измерения распределения магнитного поля, которое достаточно хорошо совпало с расчетной зависимостью (рисунок 2б). После сборки ЭОС было выполнено ее тестирование путем установки вместо резонатора гиротрона окрашенной металлической мишени для получения отпечатка пучка. Полученное значение радиуса ведущих центров пучка в пределах точности измерений соответствовало расчетному значению 8,5 мм.

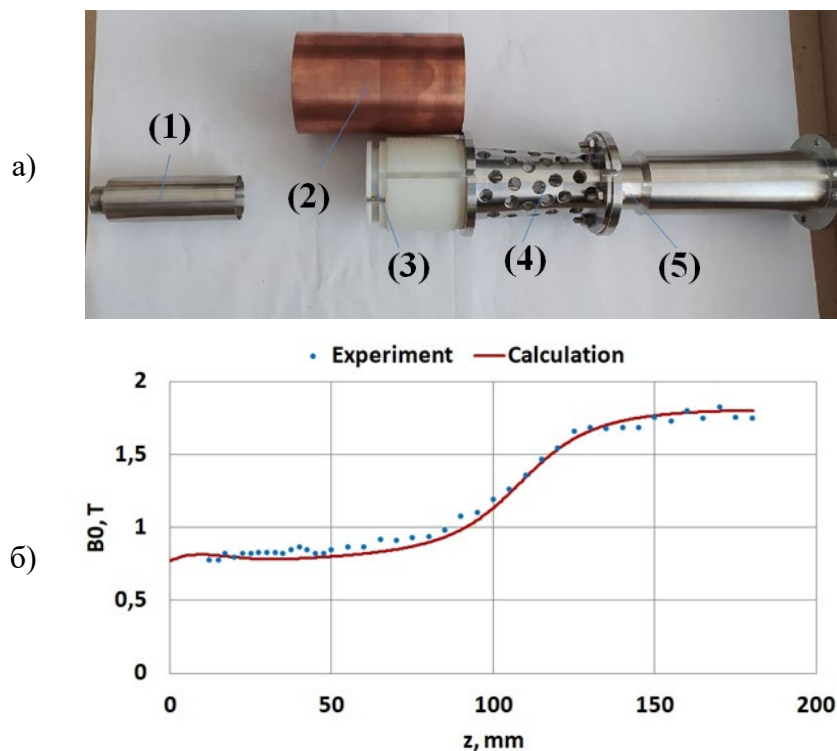


Рисунок 2. а) Внешний вид изготовленных элементов гиротрона: 1 – катод, 2 – медная экранирующая оболочка, 3 – каркас катушки кикера, 4 – канал транспортировки пучка, 5 – резонатор гиротрона. б) Расчетная зависимость от продольной координаты (сплошная линия) и измеренные значения (точки) величины магнитного поля на оси системы.

3. Результаты экспериментальных исследований гиротрона

Резонатор гиротрона, рассчитанный на возбуждение моды $TE_{3,2}$ обратного вращения в диапазоне 30 ГГц при магнитных полях 1,6-1,8 Тл и моды $TE_{4,2}$ обратного вращения в диапазоне 35 ГГц при магнитных полях 1,9-2,0 Тл, был изготовлен на основе расчетов, выполненных ранее в работах [1, 2]. В силу достаточно малой длины резонатора и, соответственно, величины дифракционной добротности, резонатор был изготовлен из нержавеющей стали. Это позволило избежать проблемы экранировки импульсного магнитного поля внутри резонатора, которая возникла бы в случае использования в качестве материала меди, имеющей существенно лучшую проводимость. Выходной конус резонатора гиротрона сочленялся со сверхразмерным волноводом круглого сечения. После окончания взаимодействия электронный пучок высаживался на стенки волновода в поле дополнительной осаждающей катушки, располагающейся после резонатора гиротрона. Вывод излучения из вакуумного объема осуществлялся через вакуумное окно из лавсановой пленки.

Основная часть излучения, проходящего через выходное вакуумное окно, поступала в терморпарный калориметр, осуществляющий измерение полной энергии микроволнового импульса. Небольшая часть излучения перехватывалась волноводом и поступала на детектор, регистрирующий форму огибающей сигнала, и смеситель. Сигнал с гетеродина, работающего на частоте примерно на 0,5-1 ГГц ниже предполагаемой частоты генерации гиротрона, также подавался на смеситель, промежуточная частота с выхода которого использовалась для расчета спектра сигнала. Для регистрации сигнала с детектора и смесителя использовался осциллограф с рабочей полосой 4 ГГц и частотой дискретизации 20 млрд. выборок в секунду.

В расчетных областях магнитных полей были зарегистрированы режимы генерации с характерной длительностью импульсов порядка 5 нс с частотами генерации примерно 30,6 и 35,2 ГГц, соответствующих возбуждению мод $TE_{3,2}$ и $TE_{4,2}$, соответственно. Мощность полученных импульсов оценивалась по результатам калориметрических измерений и достигала значений 35-40 МВт. Дополнительным подтверждением достигнутого уровня мощности являлась засветка табло из неоновых ламп.

Пример экспериментальных осциллограмм представлен на рисунке 3.

4. Заключение

Следует отметить, что полученный уровень мощности в релятивистском гиротроне оказался в несколько раз ниже расчетных значений. Одной из причин подобного поведения системы может являться неоптимальная величина тока пучка, получаемого с взрывного катода, которую затруднительно точно предсказать с помощью моделирования. Для регулировки рабочего тока можно использовать двойной коаксиальный катод [3].

Другим фактором, затрудняющим экспериментальное исследование, является нагрев проводящей оболочки индукционными токами. Согласно расчетам, это приводит к существенному изменению проводимости оболочки, изменение конфигурации магнитного поля, падению питч-фактора при одновременном возрастании начального разброса электронов по поперечным скоростям.

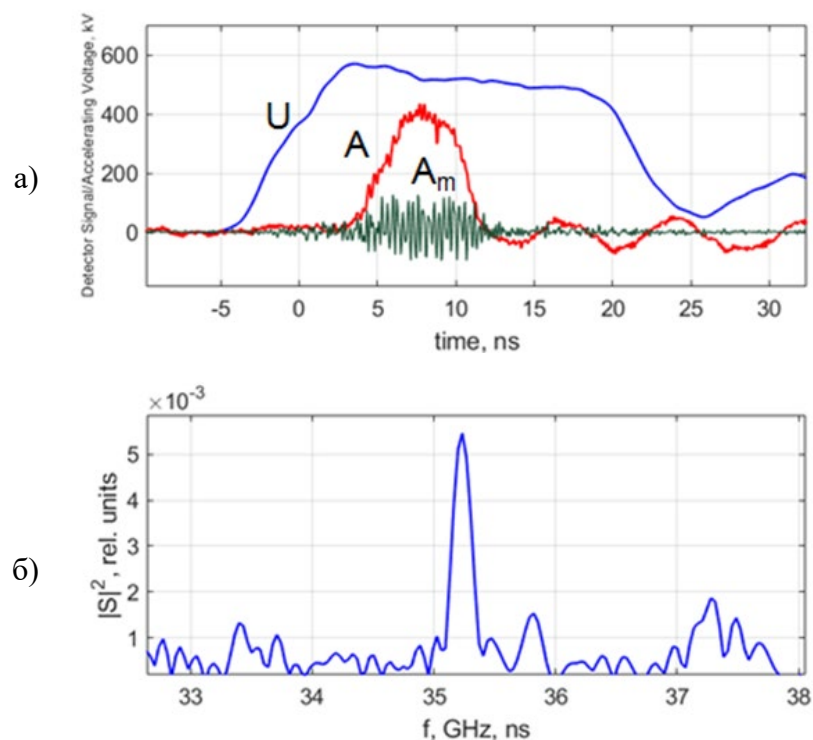


Рисунок 3. а) Осциллограммы импульса ускоряющего напряжения U , сигнала на выходе детектора A и смесителя A_m . б) Спектр излучения в режиме генерации моды $TE_{4,2}$.

В дальнейшем планируется провести исследование величины нагрева оболочки при однократном импульсном воздействии и в серии импульсов. Ожидается, что полученные данные позволят соответствующим образом корректировать токи соленоида и кикера для обеспечения высоких значений питч-фактора пучка в сочетании с относительно низкой величиной разброса по поперечным скоростям.

Исследование выполнено в рамках **государственного задания ИПФ РАН (тема № 0035-2023-0001)**.

Список литературы

1. Абубакиров Э.Б. и др. Разработка сильноточного релятивистского гиротрона миллиметрового диапазона // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т.82. – №1. – С.56-60.
2. Вилков М.Н. и др. Моделирование сильноточного релятивистского гиротрона на ТМ-моду продольно-щелевого резонатора. // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 2. – С.5.
3. Нечаев В.Е., Солуянов Е.И., Фукс М.И. Управление током трубчатого пучка электронов с помощью экранирующего пучка в диоде с магнитной изоляцией // Письма в ЖТФ. 1979. Т.5, вып.2, С.113.