

Разработка и исследование сильноточного релятивистского гиротрона с рабочей модой ТМ-типа

Э.Б. Абубакиров, Ю.Ю. Данилов, А.Н. Денисенко, А.Н. Леонтьев, Р.М. Розенталь

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: Представлены основные этапы разработки гиротрона субгигаваттной мощности Ка-диапазона с рабочей модой ТМ_{5,1}. Для дискриминации мод ТЕ-типа предложено использовать резонатор продольно-щелевого типа. Развита аналитическая теория такого резонатора, выполнены расчеты методов конечных элементов и "холодные" электродинамические измерения продольно-щелевого резонатора. Представлены результаты первых экспериментов по получению излучения.

Ключевые слова: гиротрон, сильноточный электронный пучок, селекция мод в резонаторах

1. Введение

В настоящее время ведутся активные исследования в области создания СВЧ-источников миллиметрового диапазона с субгигаваттным уровнем выходной мощности [1-3]. Использование для этой цели гиротронов представляет определенный интерес, поскольку при циклотронном взаимодействии отсутствует необходимость транспортировки электронного потока вблизи поверхности электродинамической системы. Для достижения субгигаваттного уровня мощности для запитки гиротронов необходимо использовать релятивистские винтовые электронные потоки, формируемыми взрывоэмиссионными катодами.

Однако достаточно давно известно, что характерные для электронно-оптических систем с взрывоэмиссионными катодами рабочие токи величиной в несколько килоампер существенно превышают оптимальные значения, соответствующие максимальному КПД в гиротронах [4]. Повышение эффективности взаимодействия может быть достигнуто за счет снижения коэффициента связи электронного пучка с рабочей волной. Естественный путь уменьшения коэффициента связи состоит в увеличении индексов рабочей моды. Однако при этом значительно возрастает проблема селективного возбуждения рабочего колебания, особенно на временах в десятки наносекунд, соответствующих характерной длительности сильноточных электронных пучков. Существенно улучшить ситуацию позволяет переход на взаимодействие с ТМ-модами, для которых коэффициент связи пучка с волной в $\sim(v_{||}/c)^2$ раз ниже, чем для ТЕ-мод, где $v_{||}$ - продольная скорость электронов, c - скорость света [5,6]. Одним из вариантов селективного возбуждения в гиротронах мод ТМ-типа является использование электродинамической структуры продольно щелевого типа. По аналогии с задачей распространения волн в круглом волноводе с большим числом продольных щелей [7], при ширине щелей много меньше рабочей длины волны, такая структура для ТМ-мод мало отличается от резонатора со сплошной металлической стенкой. В свою очередь ТЕ-моды эффективно излучаются во внешнее пространство. Работоспособность данного подхода была продемонстрирована в работе [8], где прорезание тонких щелей в резонаторе сильноточного релятивистского гиротрона позволило исключить в экспериментах паразитное возбуждение на ТЕ-модах.

2. Разработка сильноточного гиротрона Ка-диапазона

Аналитически оценить степень подавления паразитной ТЕ-моды можно, рассматривая открытый резонатор круглого поперечного сечения, с большим числом периодически расположенных узких продольных щелей в рамках дипольного приближения [9]. Опираясь на данные расчета по усредненным уравнениям гиротрона Ка-диапазона с рабочей модой $TM_{5,1}$ [10] и принимая, что структура поля в резонаторе с $L = 28$ мм и $R = 13$ мм близка к синусоидальной, так что $F(z) = \sin(\pi z/L)$. Полагая длину щелей a равной длине однородного участка и принимая во внимание необходимость выполнения условия $b < a$, $b < \lambda$, где b – ширина щели, $\lambda \approx 9$ мм – рабочая длина волны, выберем ширину щели $b = 1.5$ мм. Тогда при расстоянии между щелями равным 1 мм на длине окружности поперечного сечения резонатора можно разместить около 30 щелей. В этом случае, внешняя добротность ближайшей к рабочей ТМ-моды моды $TE_{4,2}$ составит величину $Q_{ext}^{TE} \approx 0.4$. В свою очередь, ненагруженная добротность открытого резонатора гиротрона со сплошной стенкой можно рассчитать по формуле $Q_0 \approx 4\pi(L/\lambda)^2$ [11], что для резонатора длиной 28 мм с рабочей частотой 30 ГГц дает значение $Q_0 \approx 100$. Соответственно нагруженная добротность резонатора составит $Q^{TE} = Q_0 Q_{ext}^{TE} / (Q_0 + Q_{ext}^{TE}) \approx Q_{ext}^{TE} \ll Q_0$, что, фактически, означает ее полное подавление. При этом внешняя добротность рабочей ТМ-моды составит величину $Q^{TM} \approx 10^4$, так что полная добротность $Q^{TM} = Q_0 Q_{ext}^{TM} / (Q_0 + Q_{ext}^{TM}) \approx Q_0 \ll Q_0$.

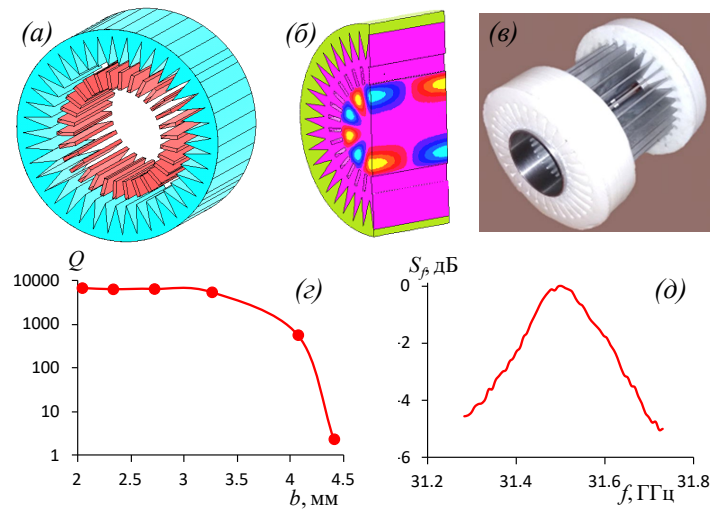


Рисунок 1. Модель закрытого пластинчатого резонатора (а), пространственная структура возбуждаемой моды $TM_{5,1}$ (б) и внешний вид макета открытого пластинчатого резонатора (в). Зависимости добротности моды Q от ширины щелей b (г) и измеренная резонансная кривая моды $TM_{5,1}$ (д).

С точки зрения практической реализации представляет интерес вариант резонатора, регулярная часть которого образована набором продольно расположенных металлических пластин, разделенных щелями. При этом встает вопрос выбора оптимального числа пластин. Недостаточное число пластин и, как следствие, увеличение ширины щелей a , очевидно, будет приводить к уменьшению внешней добротности Q_{ext}^{TM} , которое в итоге может заметно повлиять на значение полной добротности рабочей моды. В то же время, увеличение числа пластин и уменьшение зазора между ними влечет за собой очевидное усложнение конструкции резонатора. Для определения необходимого числа пластин методом конечных элементов исследовалась закрытая конфигурация резонатора с рабочей модой $TM_{5,1}$ (рис. 1а,б), собственная частота которой в гладком волноводе составляет около 32 ГГц.

Регулярный участок резонатора был образован набором продольных металлических пластин толщиной 1 мм, высотой 5 мм и длиной 28 мм, расположенных эквидистантно по азимутальному углу. Снаружи пластин располагался поглотитель в виде заостренных продольных ребер. В качестве материала резонатора выбиралась нержавеющая сталь с удельной проводимостью $1.45 \cdot 10^6$ См/м.

Расчеты показали, что при зазорах между пластинами более 4 мм добротность рабочей моды стремительно уменьшается, достигая значений в несколько единиц (рис.1г). В то же время при уменьшении зазора менее 2 мм добротность практически перестает меняться, достигая значений порядка 6000, что соответствует значению омической добротности исследуемого резонатора. В результате была выбрана конфигурация резонатора, состоящего из 31 пластины, зазор между которыми составляет около 1.5 мм. На втором этапе был выполнен расчет добротностей моды $TM_{5,1}$ и ближайшей по частоте моды $TE_{4,2}$ в открытом пластинчатом резонаторе, ограниченном критическим сужением с катодного конца и выходным конусом с коллекторного конца. Для этого с катодного конца резонатор сопрягался с волноводом, в котором возбуждалась рабочая мода и снималась частотная зависимость коэффициента прохождения между входным и выходным сечениями. Добротность моды определялась по ширине резонансной кривой и составила величину $Q^{TM} \approx 135$, что соответствует аналитическим оценкам.

На основании данных расчетов был изготовлен макет продольно-щелевого резонатора, в котором для равномерного позиционирования пластин по азимутальному углу использовались пластиковые «обоймы», изготовленные методом 3D печати (Рис. 1в). Холодные измерения проводились путем возбуждения резонатора прямоугольным диэлектрическим волноводом. На выходе резонатора был установлен козырьковый преобразователь рабочей волны в направленный волновой пучок. Измерения показали наличие резонансного максимума с центральной частотой 31.5 ГГц и добротностью $Q \approx 130$ (Рис. 1д), что хорошо соответствует расчетным значениям.

3. Экспериментальное исследование сильноточного гиротрона Ка-диапазона

Гиротрон Ка-диапазона был разработан на основе сильноточного ускорителя "Синус-6", формирующем электронный пучок с током до 5 кА при ускоряющем напряжении до 600 кВ в импульсах длительностью 20 нс. Схема гиротрона представлена на рис.2а. Коаксиальный кромочный катод (1) из нержавеющей стали формировал прямолинейный электронный поток (2) с током до 2 кА. Магнитная изоляция пушки и проведение пучка осуществлялись с помощью импульсного соленоида (5) с диаметром рабочего отверстия 58 мм, протяженностью участка однородного поля 200 мм и максимальной величиной поля 3 Тл. Винтовой электронный пучок с радиусом ведущих центров 8.5 мм создавался путем раскочки прямолинейного электронного потока (2) в поле кикера (3), представляющего собой катушку прямоугольного сечения 3×2 мм² и внутренним радиусом 12,5 мм. Импульсное значение тока через кикер достигало 10 кА, что позволяло сформировать пучок с питч-фактором порядка 1.0 [12]. Для оптимального сопряжения кикера с имеющимся источником импульсного напряжения была использована последовательно соединенная с ним балластная катушка (7), расположенная внутри основного соленоида и одновременно обеспечивающая осаждение электронного пучка на выходе из резонатора (6).

На рис.2б представлен внешний вид гиротрона. Пластинчатый резонатор был изготовлен методом электроэрозионной обработки из сплошной заготовки нержавеющей стали (Рис.2в). В ходе экспериментальных исследований при значениях ускоряющего напряжения 570 кВ, токе пучка 1.5 кА и ведущем магнитном поле около

2 Тл были зарегистрированы устойчивые режимы генерации СВЧ-излучения с длительностью импульсов 10-12 нс и мощностью в десятки мегаватт, что существенно ниже расчетной мощности порядка 200 МВт. Частота выходного излучения при этом была ниже расчетной на 1.5%. Вместе с тем, данные режимы генерации сохранялись и при сдвиге осаждающей катушки по направлению к кикеру и исключении электронно-волнового взаимодействия пучка с рабочей модой в резонаторе. В этой связи было сделано предположение, что имеет место самовозбуждение участка формирования винтового пучка, что впоследствии было подтверждено с помощью 3-D PIC моделирования, включающего в себя область раскачки пучка.

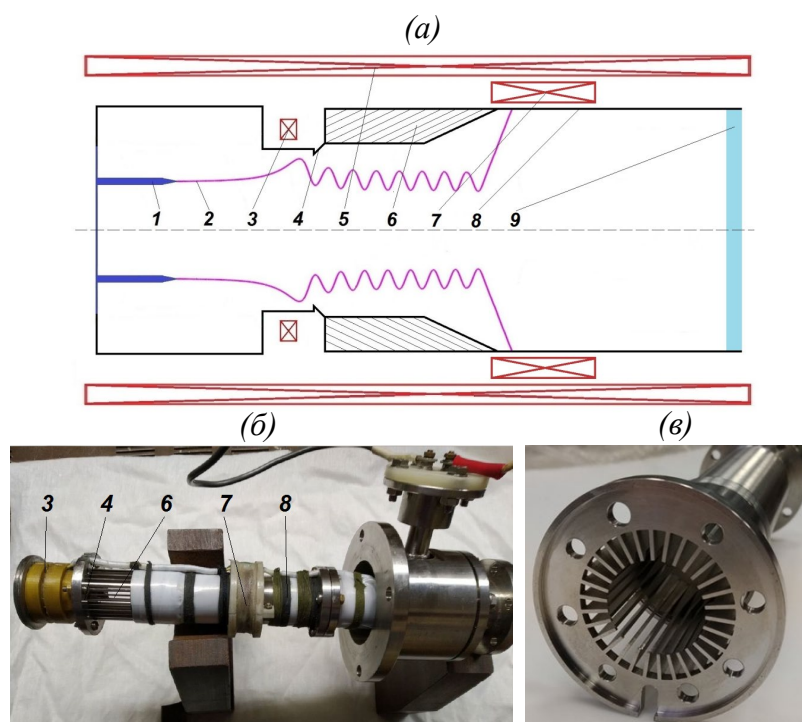


Рисунок 2. Схема (а) и внешний вид (б) исходного варианта гиротрона и пластинчатого резонатора (в): 1 – трубчатый катод, 2 – прямолинейный электронный поток, 3 – катушка кикера, 4 – закритическое сужение, 5 – соленоид ведущего магнитного поля, 6 – пластинчатый резонатор, 7 – осаждающая катушка, 8 – выходная волноведущая секция, 9 – вакуумное окно.

Возможной модификацией гиротрона, призванной подавить паразитное самовозбуждение областей вне резонатора может стать применение электронной пушки с магнитной компрессией, где раскачка пучка кикером осуществляется в относительно слабом поле, после чего магнитное поле нарастает до рабочего значения. В результате, на участке компрессии происходит одновременное сжатие пучка и увеличение его осцилляторной скорости, по аналогии с традиционными магнетронно-инжекторными пушками слабoreлятивистских гиротронов. В такой конфигурации, в отличие от случая, где катод и кикер расположены в области однородного поля основного соленоида, возможно реализовать режим без частичного осаждения электронов на стенку системы [12], а участок канала транспортировки, соответствующий нарастающему участку магнитного поля будет более устойчивым к самовозбуждению.

4. Заключение

Теоретически и экспериментально показана возможность практического полного подавления мод TE-типа в резонаторах продольно-щелевого типа. Предложена конструктивная реализация такого резонатора, включающего набор

металлических пластин, равномерно размещенных по угловой координате.

Разработана конструкция сильноточного гиротрона Ka-диапазона с субгигаваттным уровнем выходной мощности с рабочей модой ТМ-типа и проведены его первые экспериментальные исследования. Показано, что при использовании классической схемы построения гиротрона с разделением пространства формирования пучка и области электронно-волнового взаимодействия возникает проблема паразитного самовозбуждения на участке формирования пучка.

Предложена модификация гиротрона, призванная преодолеть проблему самовозбуждения области формирования электронного пучка и достичь расчетного уровня выходной мощности

Исследование выполнено в рамках государственного задания №0030-2021-0027 (Программа "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года").

Список литературы

1. B. Deng et al. Preliminary research of a V-band coaxial relativistic transit-time oscillator with traveling wave output structure // *Phys. Plasmas*. – 2021. – Т. 28. – №10. – С. 103103.
2. A. M. Malkin et al. Relativistic sub-THz surface-wave oscillators with transverse Gaussian-like radiation output // *IEEE Electron Dev. Lett.* – 2021. – Т. 42. – № 5. – С. 751-754.
3. A.V. Palitsin et al. Design of W-band Relativistic Surface-Wave Oscillator with Sheet Electron Beam // 2021. – 6th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz).
4. Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С. К нелинейной теории релятивистского гиротрона // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. – 1979. – Т. 22. – № 6. – С. 754-763.
5. Bratman V.L. et al Relativistic gyrotrons and cyclotron autoresonance masers // *Int. J. Electron.* – 1981. – Т. 51, № 4. – С. 541-567.
6. Абубакиров Э.Б. Возбуждение поперечно-магнитных волн и селекция мод в релятивистских МЦР // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. – 1983. – Т. 26. – № 4. – С. 492-496.
7. Котик И.П. и др. Теоретический анализ и некоторые применения волноводов круглого сечения с продольными щелями // *Радиотехника и электроника*. – 1965. – Т. 10. – № 7. – С. 1226-1232.
8. Братман В.Л. и др. Релятивистские оротроны–мощные источники когерентного миллиметрового излучения // *Письма в ЖТФ*. – 1984. – Т. 10. – № 13. – С. 807-811.
9. Y. Y. Danilov et al. Slit-Type Cavities for Cyclotron Resonance Masers Operating at TM Modes // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2021. – Т. 68. – № 4. – С. 2130 – 2132.
10. Р.М. Розенталь и др. Разработка сильноточного релятивистского гиротрона миллиметрового диапазона // *Известия РАН. Серия физическая* 2018. – Т. 82. – №. 1. – С. 56-60.
11. Власов С.Н. и др. Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. – 1969. – Т. 12. – № 8. – С. 1236-1244.
12. Abubakirov E.B. et al Electron-optical system for a high-current Ka-band relativistic gyrotron // *Phys. Plasmas*. – 2019. – Т. 26. – № 3. – С. 033302.