

Мощный релятивистский гиротрон миллиметрового диапазона длин волн на второй циклотронной гармонике

*Н.А. Завольский, Е.В. Иляков, Ю.К. Калынов, И.С. Кулагин, В.Н. Мануилов, А.С. Шевченко
Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН, 603950, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
e-mail: ilyakov@appl.sci-nnov.ru*

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на продвижение импульсных гиротронов на релятивистских электронных пучках в диапазон миллиметровых длин волн с сохранением мультимегаваттного уровня мощности. Использование взаимодействия на второй гармонике гирочастоты, для которого свойственны достаточно высокая эффективность и доступность решения проблемы селекции мод, позволяет увеличить частоту генерации вдвое без увеличения индукции магнитного поля. В соответствующем эксперименте получена выходная мощность излучения свыше 2 МВт и КПД около 30 % на длине волны 5,5 мм.

Powerful millimeter-wave relativistic gyrotron operating at the second cyclotron harmonic. N.A. Zavolsky, E.V. Ilyakov, Yu.K. Kalynov, I.S. Kulagin, V.N. Manuilov, A.S. Shevchenko. Results of theoretical and experimental studies, intended for advancement of pulsed gyrotrons with relativistic electron beams to a millimeter-wave range with maintenance of multi-megawatt power level, are presented. The use of interaction at the second cyclotron harmonic, having sufficiently high efficiency and accessibility of solution of the mode-selection problem, makes it possible to double the generated frequency without growth of magnetic field. In the proper experiment the output radiation power over 2 MW and efficiency near 30% were obtained for the wave length of 5.5 mm.

1. Введение

Данная работа является продолжением работы [1] и направлена на продвижение гиротронов на релятивистских электронных пучках в коротковолновый (миллиметровый) диапазон длин волн с сохранением мультимегаваттного уровня мощности [2-5]. Электромагнитное излучение такой мощности перспективно к применению в ряде развивающихся научных и технических приложений. Переход в коротковолновый диапазон, а также применение электронных пучков с релятивистскими энергиями сопряжены с необходимостью обеспечения для работы гиротронов достаточно больших магнитных полей. Приобретая выигрыш в мощности активной среды при переходе в область релятивистских энергий пучков, гиротрон, однако, становится «менее коротковолновым» из-за роста массы электронов и убывания циклотронной частоты при заданной величине магнитного поля.

Решить проблему можно за счет перехода к работе гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты. Использование взаимодействия на второй гармонике гирочастоты, для которого свойственны достаточно высокая эффективность и доступность решения проблемы селекции мод, позволит увеличить частоту генерации вдвое без увеличения индукции магнитного поля [6]. В пробных экспериментах по реализации гиротрона на релятивистском электронном пучке на второй циклотронной гармонике с рабочей волной ТЕ_{3,7} было получено излучение мегаваттного уровня мощности на частоте 50,4 ГГц с КПД 15% [1]. Необходимо отметить, что исследования велись с гиротроном, изначально рассчитанным для работы на основной гармонике гирочастоты, с неоптимальными для работы на второй циклотронной гармонике параметрами (завышенная длина резонатора, высокая плотность расположения мод по частоте вблизи рабочей моды), что накладывало ограничения на эффективность одномодовой работы гиротрона, величину рабочих токов и выходную мощность. В то же время и в этих, достаточно жестких, условиях за счет подбора рабочего режима, в т.ч. с использованием дополнительных средств селекции рабочей волны (режим включения с применением диафрагмы, см [1]), оказалась возможна эффективная генерация на второй циклотронной гармонике. Если не придерживаться в расчетах размеров имеющегося резонатора, то возможности по оптимизации и улучшению выходных параметров гиротрона расширятся еще больше.

2. Результаты численного моделирования

В результате такой оптимизации был разработан проект релятивистского гиротрона с новым резонатором, рассчитанного на работу на второй гармонике гирочастоты на волне TE11.2. При расчете по нестационарной модели гиротрона с нефиксированной структурой ВЧ поля использовались параметры винтового электронного пучка (ВЭП) близкие к ранее использовавшимся: энергия электронов 280 кэВ, диаметр пучка ~20 мм, питч-фактор ~1,3. В данном гиротроне подобрана область параметров, в которой рабочая мода при определенной величине магнитного поля имеет существенное преимущество по стартовому току перед конкурирующими модами на основной циклотронной гармонике не только при номинальном значении ускоряющего импульса напряжения (рис. 1), но и на его фронте (рис. 2). А это важно, так как на достаточно протяженном фронте питающего импульса может иметь место более раннее возбуждение паразитных мод на первой гармонике гирочастоты, которые при достижении расчетных параметров пучка продолжают свое существование, подавляя расчетную моду [7].

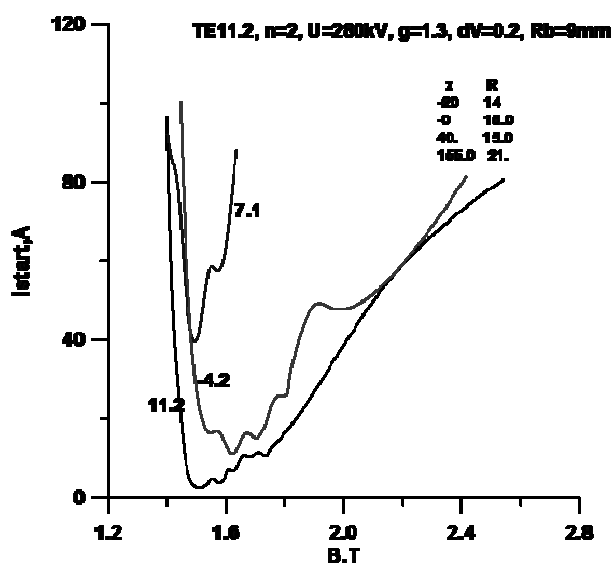


Рис. 1. Расчетные стартовые токи моды на второй циклотронной гармонике (TE11.2) и ближайших паразитных мод на основном циклотронном резонансе в зависимости от магнитного поля.

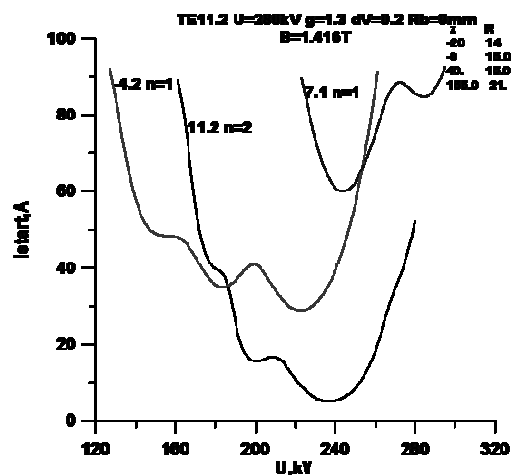


Рис. 2. Стартовые токи мод в зависимости от напряжения.

Результаты численного моделирования показывают, что в проектируемом гиротроне при заданном магнитном поле 1,4-1,5 Т стартовый ток рабочей моды составляет 5 А, а у паразитных мод превышает 30 А (рис. 1). Расчетный КПД составляет 30%, а уровень выходной мощности излучения может достигать 5 МВт на длине волны 5,5 мм (рис. 3).

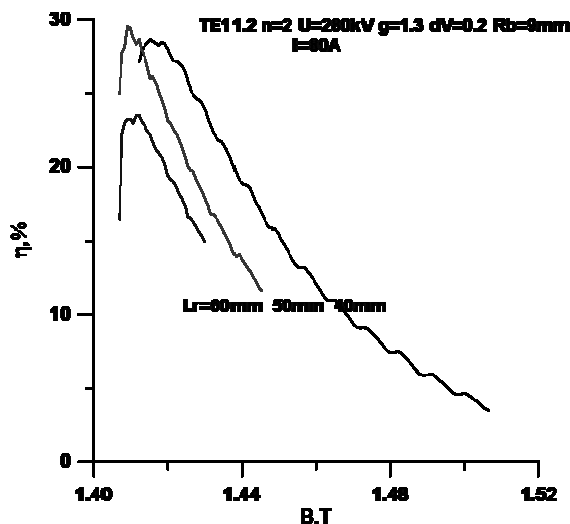


Рис. 3. Расчетная зависимость эффективности гиротрона от магнитного поля для трех длин резонатора.

3. Схема эксперимента и условия его проведения

Эксперименты проводились на сильноточном микросекундном электронном ускорителе «Сатурн-Д» с термоэмиссионным инжектором на базе магнетронно-инжекторной пушки, формирующей пучки с энергией электронов до 350 кэВ, током до 300 А, длительностью импульса до 10 мкс [8]. Схема эксперимента приведена на рис.4. С целью предотвращения развития СВЧ пробоя резонатор гиротрона изготавливался из бескислородной меди и поддерживался во время работы СВЧ прибора при температуре 400-600°C для устранения адсорбированных молекул [9]. Для предупреждения возникновения паразитной генерации и СВЧ пробоя во входной части канала транспортировки, что, в свою очередь, вызывает высоковольтный пробой в пушке, во входном конусе размещались СВЧ поглотители (позиция 10 на рис. 4). В исследованиях релятивистского гиротрона 8-мм диапазона применение таких поглотителей позволило повысить ток транспортировки и пич-фактор электронного пучка, а соответственно и выходную мощность гиротрона [10]. Выходной тракт гиротрона заканчивался плавным рупором большого диаметра и вакуумным СВЧ окном из материала (фторопласт диаметром 180 мм), обеспечивающего малую величину отражений в широком диапазоне частот [10].

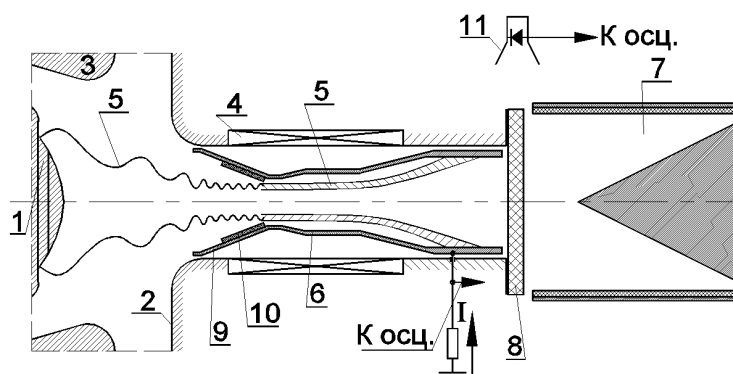


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 – катод, 2 – анод, 3 – промежуточный анод, 4 – соленоид, 5 – винтовой электронный пучок, 6 – резонатор гиротрона, 7 – калориметр, 8 – вакуумное окно, 9 – входной конус, 10 – СВЧ поглотитель, 11 – приемный рупор.

Мощность излучения в эксперименте измерялась с помощью импульсного твердотельного калориметра 7 аналогичного [11], но с большей входной апертурой (300 мм). Частота излучения определялась набором запердельных волноводов и гетеродинным методом.

4. Экспериментальные исследования

Проведенные эксперименты показали, что в области расчетных параметров (магнитного поля, ускоряющего напряжения), при превышении тока пучка ~ 10 А происходит селективное возбуждение рабочей моды TE_{11.2} на второй гармонике гирочастоты (рис. 5). Частота излучения, измеренная гетеродинным методом, составила 55,67 ГГц. При увеличении тока пучка выходная мощность излучения растет и достигает максимального значения 2,1 МВт $\pm 10\%$ при токе пучка 38 А (рис. 6). С увеличением тока пучка растет и КПД, который достигает своего максимума $\sim 30\%$ при токе 32 А. Дальнейшее повышение тока привело сначала к снижению КПД, а затем и мощности излучения. Это не соответствует результатам численного моделирования, где при сохранении качества пучка КПД и выходная мощность продолжают расти вплоть до тока 120 А. По-видимому, в эксперименте при превышении тока 32 А происходит увеличение скоростного разброса и падение пич-фактора. Предварительные оценки показывают, что ток пучка 40 А составляет около трети предельного тока электронной пушки и можно ожидать негативного влияния пространственного заряда пучка.

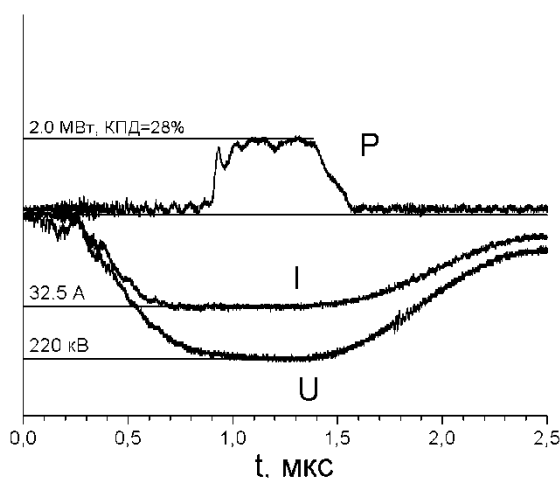


Рис. 5. Осциллограммы сигналов в режиме максимального КПД: U – напряжение; I – ток пучка; P – СВЧ излучение.

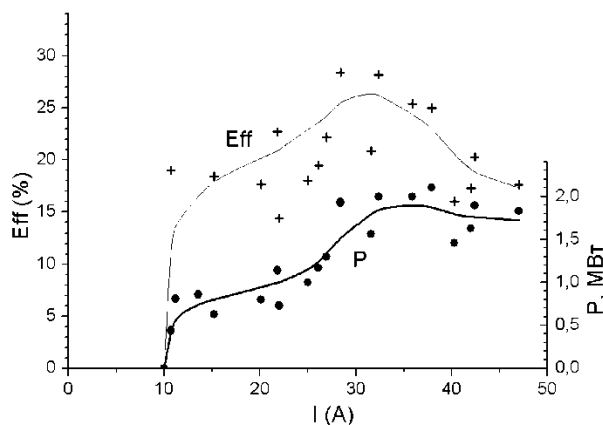


Рис. 6. Зависимость выходной мощности P и эффективности гиротрона от тока пучка.

Необходимо отметить, что при повышении тока в ряде случаев происходило возбуждение паразитной моды TE_{4.2} на основной циклотронной гармонике с частотой излучения 29,67 ГГц. Однако, небольшое понижение магнитного поля, позволяло полностью отстроиться от возбуждения паразитной генерации, обеспечивая работу гиротрона на рабочей моде на второй циклотронной гармонике.

Таким образом, в гиротроне на релятивистском электронном пучке на второй циклотронной гармонике реализовано мощное излучение двухмегаваттного уровня на длине волны 5,5 мм с достаточно высокой эффективностью около 30%, что показывает перспективность продвижения данных приборов в более коротковолновый диапазон. В ближайшие планы входят работы по увеличению выходной мощности гиротрона с увеличением тока пучка.

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 15-02-08016, 15-02-09130.

Литература

1. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К. и др. // «Вакуумная наука и техника». Материалы XXIII научно-технической конференции. Под ред. С.Б. Нестерова. М.: Новелла. 2016. С.29-33.
2. Зайцев Н.И., Гинзбург Н.С., Завольский Н. А. и др. // Письма в ЖТФ, 2001, т.27, № 7, с.8-12.
3. Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запелалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2003. Т.46. №10. С.914-918.

4. Абубакиров ЭБ., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г и др. // Изв. вузов. «ПНД», 2015. Т.23. №2. С.94-107.
5. Bratman V.L., Botvinik I.E., Grom Yu.D., et al. // Proc. SPIE of 16th Int. Symposium on discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Moscow - St. Petersburg, Russia, 1994, pp. 538-541.
6. «Гиротрон». Сборник научных трудов. Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
7. Запевалов В.Е., Малыгин С.А., Цимринг Ш.Е. // Изв. вузов. Радиофизика, 1993. Т.36. №6. С.543-552.
8. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С. и др. // ПТЭ, 1995, вып.3, с.138-145.
9. Puyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S., Zaitsev N.I. // IEEE Trans. on Plasma Science, 1998, v.26, No.3, p.332-335.
10. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Кулагин И.С. // XV Научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника». Материалы конференции. Октябрь 2008. С.96-99.
11. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К. и др. // ПТЭ, 1992. №2. С.153.

Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование второй моды одностороннего мультипакторного разряда

Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, А.С. Шевченко

*Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН, 603950, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
e-mail: ikulagin@appl.sci-nnov.ru*

Выполнены экспериментальное исследование и компьютерное моделирование второй моды мультипактора в прямоугольном волноводе, показавшие близкие результаты. Выявление при моделировании так называемых долгоживущих электронов позволило продвинуться в объяснении некоторых экспериментальных эффектов, как например, слабая зависимость перестройки резонатора от значения коэффициента вторичной эмиссии материала разрядной поверхности или от того, первая или вторая мода разряда перестраивает резонатор.

Experimental study and computer simulation of the second-mode one-sided multi-ductor discharge. E.V. Puyakov, I.S. Kulagin, A.S. Shevchenko. Experimental study and computer simulation of the second mode of multipactor discharge in a rectangular waveguide are performed showing similar results. Detection of the so-called long-lived electrons has makes it easier to explain some experimental effects. For example, it concerns weak dependence of the cavity tuning on the secondary-emission coefficient of discharge surface material.

Введение

Вторично-эмиссионный резонансный разряд (мультипактор) в скрещенных СВЧ электрическом и статическом магнитном полях [1-3] – давно известное явление. Концентрация электронов в насыщенном разряде, как показано в результате теоретических [4] и экспериментальных [5] исследований может достигать значений, близких к критическому для частоты электромагнитного излучения, в котором разряд развивается. Ведутся исследования, направленные на использование этого разряда для изменения резонансной частоты резонатора и управления потоками СВЧ излучения [6]. В ходе этих исследований в цилиндрическом резонаторе впервые была обнаружена вторая мода мультипакторного разряда в скрещенных полях [7].

Можно ожидать, что, как и разряд на первой моде [5], вторая мода разряда создает электронное облако высокой (близкой к критической) концентрации, которое может нарушать работу СВЧ приборов и волноводных трактов. Возникновение второй моды разряда, развивающейся при вдвое меньшем магнитном поле, расширяет (наряду с основной модой)