

УДК 621.385.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ГИРОКЛИСТРОНА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*Н. И. Зайцев¹, Ю. М. Гузнов¹, С. В. Кузиков¹, М. Е. Плоткин¹,
Е. М. Тай², А. С. Шевченко¹*

¹ Институт прикладной физики РАН;

² НПП «ГИКОМ», г. Нижний Новгород, Россия

В работе приведены результаты экспериментальных исследований гироклистрона с резонаторами на последовательности объёмных мод $TE_{7.1.1}$ — $TE_{7.3.1}$ и частотой излучения 35,4 ГГц. При ускоряющем напряжении 320 кВ получена выходная мощность излучения 15 МВт при коэффициенте полезного действия выше 30 %, коэффициенте усиления 30 дБ, полосе усиления 50 МГц и длительности сверхвысокочастотного импульса 0,5 мкс.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы являлось исследование возможности создания импульсного мультимегаваттного гироклистрона миллиметрового диапазона длин волн, способного работать в широком диапазоне питающих напряжений.

Применение в мощных гироклистронах резонаторов на неоднородных по азимуту модах высокого порядка позволяет увеличить поперечное сечение пространства взаимодействия электронов с электромагнитным полем до размеров, позволяющих сформировать электронный пучок необходимой интенсивности с высоким питч-фактором и малым скоростным разбросом при сохранении одномодового режима генерации [1]. В отличие от прибора, работавшего на неоднородных по азимуту модах $TE_{5.2.1}$ и $TE_{5.3.1}$ [2], в данной работе описан разработанный в ИПФ РАН гироклистрон на последовательности мод $TE_{7.1.1}$ и $TE_{7.3.1}$ с выходной мощностью 15 МВт. Переход на эти моды позволил увеличить частоту излучения до 35,4 ГГц без изменения геометрии электродов инжектора электронов.

1. СХЕМА ГИРОКЛИСТРОНА

По аналогии с предыдущей удачной разработкой [2], гироклистрон спроектирован по двухрезонаторной схеме (рис. 1). При вводе излучения в первый резонатор происходит его частичное преобразование во вращающуюся моду $TE_{7.1.1}$ резонатора кругового сечения с эффективностью свыше 60 %. Электромагнитное поле из этого резонатора излучалось в сторону электронной пушки, что дополнительно уменьшало связь между резонаторами. Дрейфовые секции, состоящие из рассеивающих и поглощающих СВЧ излучение элементов, минимизируют связь между резонаторами и предотвращают самовозбуждение паразитных колебаний в канале транспортировки. Длина входного резонатора, равная $2,5\lambda$, где λ — длина волны излучения, обеспечивает устойчивость к самовозбуждению как на гирочастоте, так и на её гармониках. Длина выходного резонатора, равная 5λ , обеспечивала отсутствие самовозбуждения при номинальных параметрах электронного пучка в режиме усиления внешнего сигнала и самовозбуждения при повышенном питч-факторе электронов. Режим самовозбуждения реализовался при отсутствии входного сигнала и уменьшении магнитного поля на катоде.

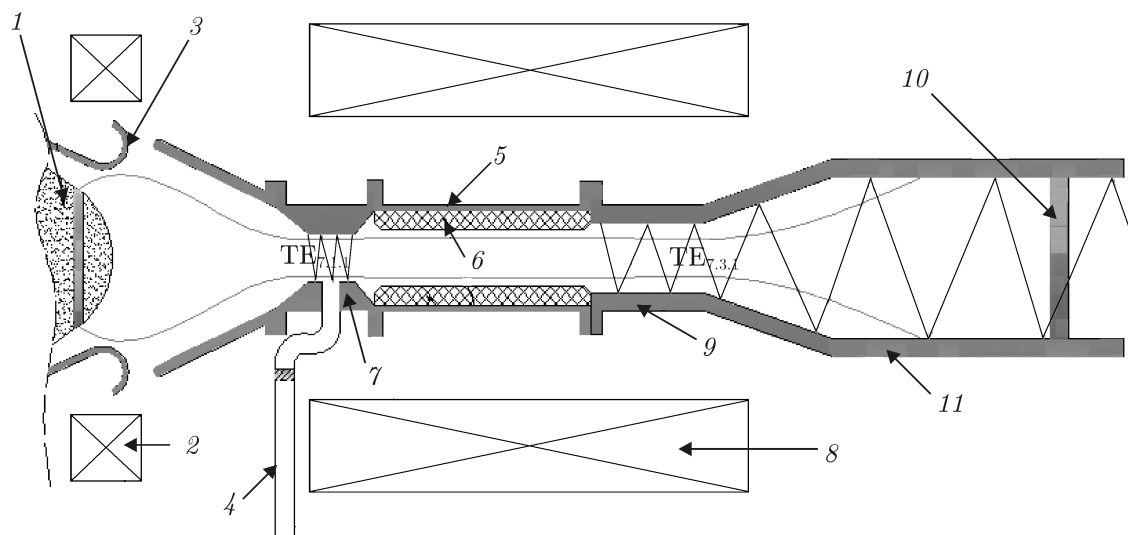


Рис. 1. Схема гироклистрона: 1 — катод, 2 — дополнительный соленоид, 3 — анод, 4 — входной волновод, 5 — труба дрейфа, 6 — поглотитель, 7 — входной резонатор, 8 — основной соленоид, 9 — выходной резонатор, 10 — выходное окно, 11 — коллектор

Для формирования электронного пучка использована трёхэлектродная магнетронно-инжекторная пушка с алюминатно-бариевым эмиттером с диаметром 100 мм и шириной 5 мм. Диаметр электронного пучка в соответствии с распределением магнитного поля криомагнита в рабочем пространстве равнялся 20 мм.

Дополнительный соленоид в области катода позволял корректировать магнитное поле в пространстве взаимодействия электронов с электромагнитным полем и тем самым изменять питч-фактор и диаметр электронного пучка. В соответствии с измерениями магнитным анализатором [3], пушка при напряжении на катоде $300 \div 350$ кВ, напряжении на аноде относительно катода $120 \div 140$ кВ и токе $100 \div 140$ А формировала электронный пучок с разбросом по поперечным скоростям частиц менее 15 % при питч-факторе $1,2 \div 1,3$.

Для вывода излучения было разработано согласованное с частотой излучения выходное окно с диаметром 66 мм, изготовленное из керамики на основе пиролитического нитрида бора. При толщине в одну длину волны окно прозрачно для моды $TE_{7,3,1}$ на частоте 35,4 ГГц, причём ширина полосы его пропускания на уровне 1 % по мощности равняется 1 ГГц. Расчётные потери в окне составляют 0,8 %.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты были выполнены на электронном микросекундном ускорителе «Сатурн F» с энергией электронов до 400 кэВ, силе тока пучка до 200 А, длительности импульса 1 мкс и частотой повторения импульсов $0 \div 10$ Гц [4]. Основное магнитное поле обеспечивалось криомагнитом, а вспомогательное поле на катоде — «тёплым» соленоидом, позволявшим оперативно изменять диаметр электронного пучка и питч-фактор.

Для обеспечения вакуумных условий, близких к существующим в герметизированных приборах, электродинамическая система прогревалась до 400°C . Далее работа велась либо при 300°C , либо при комнатной температуре. В течение двух суток после прогрева получаемые параметры (за исключением частоты автогенерации, которая изменялась на 80 МГц) не зависели от температуры, затем требовался новый прогрев. Криогенная система откачки обеспечивала в рабочем

объёме вакуум с давлением $5 \cdot 10^{-5}$ торр в дежурном (с холодным катодом) режиме и с давлением 10^{-6} торр в рабочем режиме. Эксперименты были проведены в режимах с запаздыванием напряжения, подаваемого на первый анод электронной пушки. Это предотвращало старт на переднем фронте импульса напряжения конкурирующих мод в режиме автогенерации выходного резонатора [5]. Подавление генерации конкурирующих мод необходимо, поскольку она вносит погрешность в измерение мощности выходного СВЧ излучения.

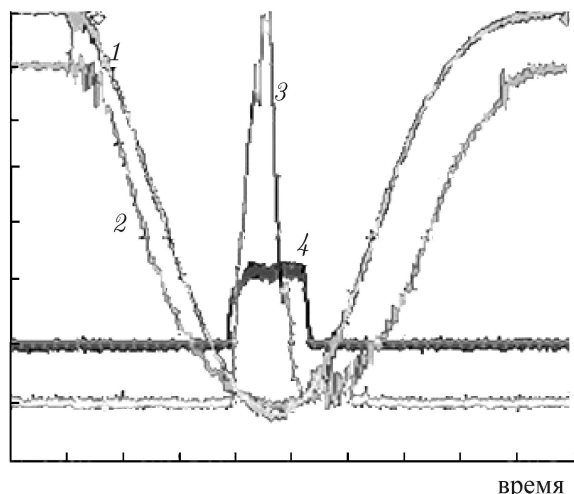


Рис. 2. Характерные осциллограммы напряжения на катоде (кривая 1; амплитуда напряжения 300 кВ), тока пучка (2), огибающих микроволновых импульсов выходного (3) и входного (4) СВЧ сигналов. Цена деления горизонтальной шкалы 500 нс

Система измерения параметров СВЧ импульсов позволяет одновременно определять огибающие входного, выходного и отражённого от входа импульсов. Спектры входного и выходного сигналов определялись гетеродинным методом. Сигналы со смесителей на промежуточной частоте записывались цифровым осциллографом «Tektronix TDS-3052» и обрабатывались для определения спектра с помощью быстрого преобразования Фурье. Для увеличения срока службы алюминатно-бариевого катода эксперименты велись в режиме коротких серий импульсов ($5 \div 10$ импульсов в каждой серии). При этом использовался моноимпульсный калориметр [6]. Адекватность такого подхода подтверждена измерениями мощности проточным калориметром при тактовой частоте $1 \div 5$ Гц в течение нескольких минут.

Ток электронного пучка измерялся резистивным шунтом, а напряжение на катоде — ёмкостным делителем. Погрешность всех измерений не превышала 10 %.

В качестве задающего генератора использовался магнетрон с выходной мощностью 10 кВт и механической перестройкой частоты.

В режиме усиления, при номинальных параметрах электронного пучка, была получена выходная мощность излучения 15 МВт при коэффициенте полезного действия (КПД) выше 30 %, коэффициенте усиления 30 дБ, полосе усиления 50 МГц и длительности СВЧ импульса 0,5 мкс. Характерные осциллограммы напряжения на катоде, тока пучка, огибающих выходного и входного СВЧ импульсов приведены на рис. 2.

Высокая эффективность прибора сохранялась в широком диапазоне технических параметров в частности напряжения катода и тока пучка (см. табл. 1).

В режимах, близких по параметрам электронного пучка к автогенерации выходного резонатора, варьировалась задержка входного СВЧ импульса относительно импульса высокого напря-

Таблица 1. Параметры гироклистрона на модах $TE_{7.1.1}$ и $TE_{7.3.1}$ с рабочей частотой 35,4 ГГц

Напряжение, кВ	Ток, А	Мощность, МВт	КПД, %	Δf , МГц	Коэффициент усиления, дБ	Магнитное поле, Тл
120	70	2,5	30	50	20	1,465
140	80	3,8	34	50	24	1,552
190	95	5,7	31	50	26	1,638
320	140	15,0	33	50	30	1,892

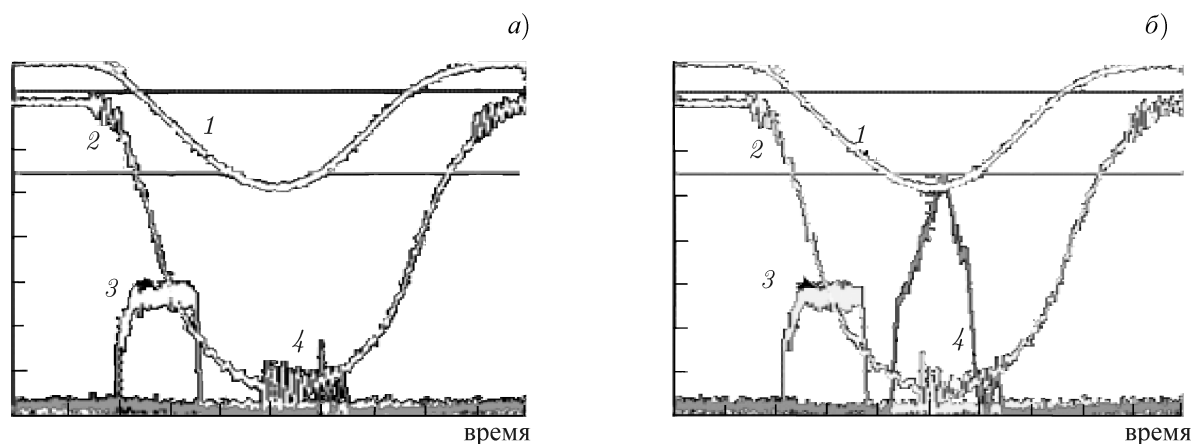


Рис. 3. Характерные осциллограммы напряжения на катоде (кривая 1), тока пучка (2), огибающих входного (3) и выходного (4) импульсов для следующих случаев: входной сигнал вне полосы циклотронного резонанса (а), входной сигнал на границе полосы циклотронного резонанса (б). Цена деления горизонтальной шкалы 500 нс

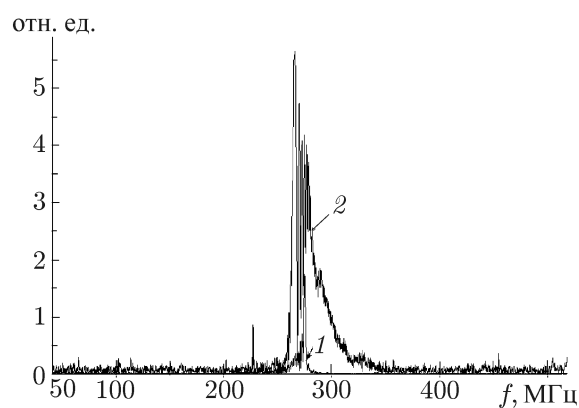


Рис. 4. Спектры входного (кривая 1) и выходного (2) СВЧ импульсов, перенесённые в полосу осциллографа (частота гетеродина 35,105 ГГц) и соответствующие режиму на рис. 3б

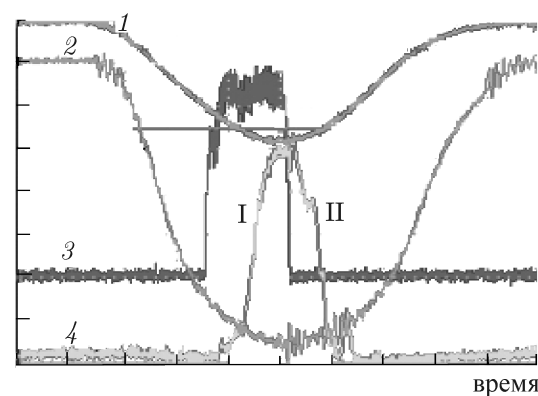


Рис. 5. Характерные осциллограммы напряжения на катоде (кривая 1), тока пучка (2), огибающих входного (3) и выходного (4) СВЧ импульсов для случая, когда входной сигнал заканчивается в центре полосы циклотронного резонанса. Цена деления горизонтальной шкалы 500 нс

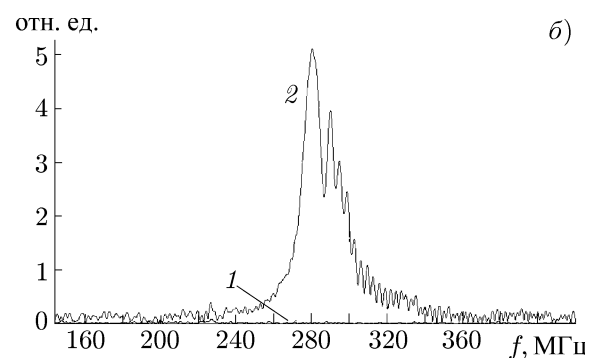
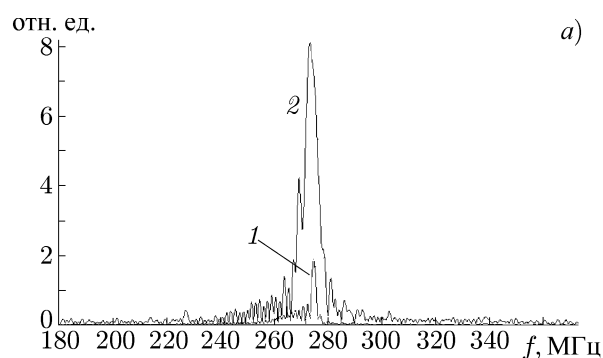


Рис. 6. Спектры входного (кривая 1) и выходного (2) СВЧ импульсов, перенесённые в полосу осциллографа (частота гетеродина 35,105 ГГц) для разных участков I и II огибающего профиля, приведённого на рис. 5. Панель (а) отвечает режиму I с входным сигналом, панель (б) — II без входного сигнала

жения. При положении входного сигнала относительно импульса питающего напряжения, при котором условие циклотронного резонанса не выполняется (рис. 3а), выходной сигнал отсутствовал. При приближении заднего фронта входного импульса к вершине импульса напряжения (т.е. к полосе циклотронного резонанса) наблюдалась генерация на рабочей моде с частотой $f_c = 35,373$ ГГц, но без захвата частоты входного сигнала $f_m = 35,380$ ГГц, т.е. в режиме автогенерации (рис. 3б, рис. 4). В случае, когда задний фронт был расположен на вершине импульса напряжения (рис. 5), спектр первой половины выходного импульса был узким (рис. 6а) и имел ширину, близкую к естественной ширине линии на частоте входного сигнала. При этом вторая часть выходного импульса имела широкий спектр (рис. 6б), соответствующий автогенерации в условиях изменяющегося напряжения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эксперименты продемонстрировали эффективную работу импульсного гироклистрона миллиметрового диапазона длин волн с мультимегаваттной выходной мощностью в широком диапазоне питающих напряжений (см. табл. 1). Охлаждаемый коллектор позволил работать при частоте следования импульсов 2 Гц, которая ограничивалась источниками питания и может быть увеличена. Такие приборы перспективны для применения в ускорителях элементарных частиц нового поколения. Заметим, что по общепринятому сравнительному параметру $P[\text{МВт}](f[\text{ГГц}])^2$ (т.е. произведению выходной мощности на квадрат частоты, равному в данном случае 18 000), наш прибор превосходит гироклистрон, разработанный в Университете штата Мериленд, для которого $Pf^2 = 80 \text{ МВт} \times (8,6 \text{ ГГц})^2 = 5900$ [7].

Очевидным путём дальнейшего развития этой разновидности гироклистронов является увеличение поперечного сечения пространства взаимодействия электронов с электромагнитным полем, как это делается в гиротронах, применяемых в установках управляемого термоядерного синтеза [8].

Авторы считают приятным долгом поблагодарить М. И. Петелина за внимание к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники» и РФФИ (грант 12-08-00544-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Кулагин И. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 830.
2. Зайцев Н. И., Гвоздев А. К., Запевалов С. А. и др. // Радиотехника и электроника. 2013. № 12. (в печати).
3. Гвоздев А. К., Зайцев Н. И., Запевалов С. А. // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 89.
4. Zaitsev N. I., Zapevalov S. A., Ilyakov E. V., et al. // RuPAC-2008. Art. no. THBH09.
5. Зайцев Н. И., Запевалов С. А., Малыгин А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 196.
6. Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Ковнеристый Ю. К. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 153.
7. Lawson W., Cheng J., Calame J. P., et al. // Phys. Rev. Lett. V. 81. P. 3030.
8. Litvak A. G., Denisov G. G., Zapevalov V. E., et al. // J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. 2011. P. 337.

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE RELATIVISTIC MILLIMETER-WAVE GYROKLYSTRON

N. I. Zaitsev, Yu. M. Guznov, S. V. Kuzikov, M. E. Plotkin, E. M. Tai, and A. S. Shevchenko

We present the results of experimental studies of the gyrokystron with cavities operated with the sequence of $TE_{7.1.1}$ — $TE_{7.3.1}$ volume modes and a radiation frequency of 35.4 GHz. At an accelerating voltage of 320 kV, we obtained an output radiation power of 15 MW for an efficiency over 30%, amplification coefficient 30 dB, amplification band of 50 MHz, and a microwave pulse duration of 0.5 μ s.