

УДК 621.385.69

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОКЛИСТРОНА С ВЫСШИМ ТИПОМ КОЛЕБАНИЙ TE_{021} В РЕЗОНАТОРАХ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Е. В. Засыпкин, И. Г. Гачев, И. И. Антаков

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования функционирования гироклистрона с рабочим типом колебаний TE_{021} в резонаторах, работающего в криомагните на частоте 93,2 ГГц. В трёхрезонаторном варианте гироклистрона достигнута максимальная пиковая выходная мощность 340 кВт при коэффициенте полезного действия (КПД) 27 %, коэффициенте усиления 23 дБ, ширине полосы усиления 0,41 % (380 МГц), ускоряющем напряжении 75 кВ и токе пучка 17 А. Ограничение выходной мощности и КПД связано с самовозбуждением рабочего типа колебаний TE_{021} в выходном резонаторе. Экспериментально изучено влияние на выходные характеристики трёхрезонаторного гироклистрона тока электронного пучка и добротности промежуточного резонатора.

ВВЕДЕНИЕ

Первым гироклистроном, работающим в коротковолновой части миллиметрового диапазона, являлся созданный в Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН) в конце 80-х годов прошлого века четырёхрезонаторный гироклистрон непрерывного действия с рабочей частотой 91,6 ГГц и полосой усиления 330 МГц [1]. В импульсном режиме этот прибор обеспечивал пиковую выходную мощность 65 кВт при полосе усиления 280 МГц [2]. В обоих случаях рабочим типом колебаний в резонаторах являлась мода TE_{011} .

С учётом результатов, полученных в ИПФ РАН и опубликованных в [2], в 1998 году в «Naval Research Laboratory» (NRL), США, и фирме «Communication and Power Industries» (CPI), США, был разработан пятирезонаторный гироклистрон с рабочей модой TE_{011} , частотой генерации 94,2 ГГц, пиковой выходной мощностью 100 кВт, средней мощностью 10 кВт и шириной полосы рабочих частот 700 МГц [3]. Этот гироклистрон используется в качестве выходного усилителя передатчика радиолокационной станции коротковолновой части миллиметрового диапазона WARLOC [4], которая применяется в основном для изучения физических явлений в атмосфере и при исследовании структуры облаков.

В радиолокационной станции HUSIR (Haystack Ultra-Wideband Satellite Imaging Radar) [5], работающей в диапазоне частот 92÷100 ГГц и предназначенной для получения радиолокационных «портретов» различных целей, для обеспечения требуемой мощности и широкой полосы частот излучения радара на выходе передатчика когерентно складываются выходные сигналы 16 гиротристронов фирмы CPI с импульсной мощностью 55 кВт и полосой усиления 1,6 ГГц каждый [6]. Рабочей модой гиротристронов также является мода TE_{011} .

Очевидно, что разработка более мощных гироклистронов и гиротристронов коротковолновой части миллиметрового диапазона позволила бы повысить чувствительность радиолокационной станции и упростить архитектуру её передатчика. Наиболее привлекательным с точки зрения повышения выходной мощности является использование резонаторов с большими поперечными сечениями и высших типов колебаний в них. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования гироклистронов частотного диапазона 93÷94 ГГц с рабочей модой TE_{021} .

Е. В. Засыпкин, И. Г. Гачев, И. И. Антаков

341

1. КОНСТРУКЦИЯ ГИРОКЛИСТРОНА

Разработка гироусилителя проводилась с учётом уже имеющегося опыта создания гироклистронов длинноволновой части миллиметрового диапазона «Стремя-2», которые были использованы в качестве выходных усилителей зондирующего сигнала радиолокационной станции «Руза» [7]. Как и в гироклистроне «Стремя-2», ввод входного сигнала осуществляется на моде TE_{01} через входной волновод, который проходит через центр катода. Далее волна TE_{01} с помощью внутреннего зеркального трансформатора преобразовывается в волну TE_{02} , которая возбуждает во входном резонаторе рабочий тип колебаний TE_{021} . Для формирования электронного потока используется однопотенциальная адиабатическая магнетронно-инжекторная пушка, рассчитанная на работу с ускоряющим напряжением 60 кВ, током пучка до 20 А и длительностью импульса тока 150 мкс, которая конструктивно объединена с системой ввода входного сигнала.

Электродинамическая система образована резонаторами в виде отрезков слабонерегулярных цилиндрических волноводов большого (в масштабе длины волны) поперечного сечения, разделённых закритическими для рабочего типа колебаний участками дрейфа. Вывод излучения из выходного резонатора на моде TE_{02} осуществляется дифракционным способом. Переход из длинноволновой в коротковолновую часть миллиметрового диапазона не требует внесения в конструкцию гироклистрона каких-либо принципиально новых элементов. Вместе с тем по мере укорочения рабочей длины волны конструктивные параметры этого прибора меняются следующим образом.

Во-первых, уменьшаются размеры резонаторов и эффективная проводимость их стенок, что приводит к увеличению относительной доли тепловых потерь и обострению проблемы теплоотвода [8]. Во-вторых, в адиабатических магнетронно-инжекторных пушках уменьшается зазор между анодом и катодом, что приводит к усилению влияния на качество пучка даже небольших нарушений аксиальной симметрии полей и электродов, возрастанию роли неоднородности эмиттера и снижению предельного тока этих устройств [9]. В-третьих, уменьшается зазор между внешней границей пучка и внутренней поверхностью электродинамической системы, в связи с чем обостряется проблема транспортировки пучка через пространство взаимодействия усилителя.

Влияние вышеперечисленных факторов на выходные характеристики гироусилителя может быть ослаблено за счёт разработки эмиттеров с гладкой поверхностью и однородной эмиссией, а также изготовления резонаторов с высокой точностью и чистотой обработки поверхности.

Кроме того, не следует забывать, что в гироклистронах с протяжённой электродинамической системой в области дрейфа пучка (до первого резонатора) возможно самовозбуждение паразитных колебаний [10], для предотвращения которого магнитное поле в этой области должно спадать достаточно резко, и поэтому диаметр «тёплого» отверстия криостата должен быть не слишком велик. Это требование ограничивает сверху поперечные размеры прибора и его элементов. С другой стороны, для минимизации дифракционных потерь во внутреннем входном преобразователе типов волн поперечные размеры зеркала должны быть достаточно велики, а входной волновод необходимо располагать не слишком далеко от зеркала. Очевидно, эти требования к поперечным размерам усилителя являются взаимно противоречивыми. Поэтому задача нахождения оптимальной конструкции прибора сводится, по сути дела, к поиску компромисса, позволяющего удовлетворить в той или иной мере этим требованиям одновременно.

В ходе эксперимента были исследованы два варианта усилителя — двухрезонаторный и трёхрезонаторный. Параметры резонаторов — длины, добротности и собственные частоты — рассчитывались на основе соотношений, приведённых в [11, 12]. Варьирование добротностей входного и выходного резонаторов осуществляется путём изменения диаметра и толщины диафрагм, связывающей резонаторы с входным и выходным волноводами. Требуемая добротность промежуточ-

ного (среднего) резонатора обеспечивается, как и в [13], за счёт излучения части запасённой в нём энергии электромагнитного поля в виде волны TE_{02} в пространство дрейфа с последующим её рассеиванием на неоднородностях дрейфа в волны TE- и ТМ-типов с азимутальными индексами, отличными от нуля.

Длины входного и выходного резонаторов в обоих вариантах гироклистрона были одинаковыми: $L_{вх} \approx 1,8\lambda$, $L_{вых} \approx 2,1\lambda$. Длина промежуточного резонатора $L_{ср} \approx 1,4\lambda$. Расчётные значения собственных частот резонаторов, добротностей рабочей моды и ближайшей низшей паразитной моды TE_{221} приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Расчётные значения собственных частот и добротностей входного и выходных резонаторов

Параметр		Входной резонатор	Выходной резонатор	
			Вариант 1	Вариант 2
Мода TE_{021}	Собственная частота, ГГц	93,13	93,07	93,04
	Добротность	146	560	375
Мода TE_{221}	Собственная частота, ГГц	88,76	89,04	88,99
	Добротность	120	470	320

Таблица 2. Расчётные значения собственных частот и добротностей промежуточных резонаторов трёхрезонаторного гироклистрона

Параметр		Вариант 1	Вариант 2
Мода TE_{021}	Собственная частота, ГГц	93,03	93,06
	Добротность	130	100
Мода TE_{221}	Собственная частота, ГГц	89,04	89,13
	Добротность	115	90

Гироклистрон помещается в магнитное поле с индукцией $3,8 \div 3,9$ Тл, создаваемое сверхпроводящим соленоидом. Расчёт оптимальной продольной конфигурации магнитного поля в рабочем пространстве проводится на основе соотношений, представленных в [14]. Формирование оптимизированного продольного распределения магнитного поля осуществляется с помощью магнитных экранов, охватывающих резонаторы снаружи, и четырёх дополнительных соленоидов, намотанных на корпус лампы.

В качестве источника входного сигнала используется механически перестраиваемый гиротрон с максимальной пиковой выходной мощностью 1,6 кВт [15]. Длительность импульса выходного излучения гиротрона равна 100 мкс. Перестройка частоты осуществляется в диапазоне $\pm 0,5$ % вблизи центральной частоты 93,3 ГГц.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУХРЕЗОНАТОРНОГО ГИРОКЛИСТРОНА

В первоначальном варианте гироклистрона в качестве выходного использовался высокодобротный резонатор с добротностью $Q_3 = 560$ (см. вариант 1 в табл. 1), а длина однородного участка магнитного поля $L_{одн} = 40$ мм приблизительно совпадала с полной длиной электродинамической системы (рис. 1, кривая 1). В этом усилителе на частоте 93,22 ГГц при ускоряющем напряжении $U_0 = 60$ кВ и токе пучка $I_0 \approx 12$ А была достигнута пиковая выходная мощность 140 кВт при

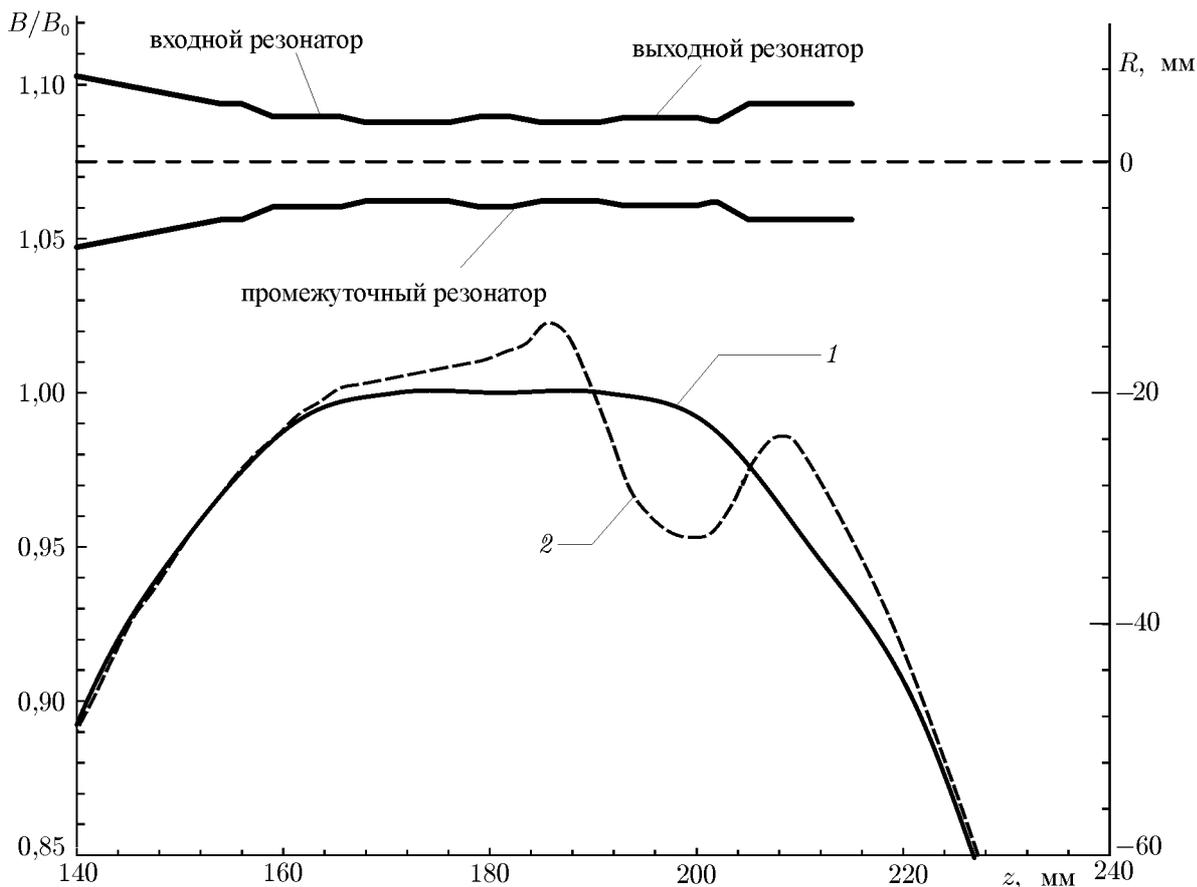


Рис. 1. Аксиальный профиль электродинамической системы гироклистрона и распределение продольной составляющей статического магнитного поля вдоль оси системы: 1 (сплошная кривая) — однородное распределение, 2 (пунктирная кривая) — оптимальное распределение

коэффициенте полезного действия (КПД) 19 % и коэффициенте усиления 18 дБ (рис. 2, кривые 1). Ограничение КПД достигнутое значение было связано с самовозбуждением колебаний на частоте 93,2 ГГц, близкой к частоте рабочей моды TE_{021} нагруженного пучком выходного резонатора.

Сравнительно низкий КПД гироклистрона обусловлен влиянием на группировку пучка разброса поступательных скоростей электронов. Заметное снижение этого влияния достигается формированием такого распределения магнитного поля, которое обеспечивало бы одновременно компактную группировку электронного потока и оптимальные условия отбора энергии у сгруппированного пучка в выходном резонаторе. На рис. 1 кривая 2 отображает оптимальное осевое распределение магнитного поля, формируемого в рабочем пространстве системой экранов и дополнительных соленоидов, а на рис. 2 кривыми 2 изображены экспериментальные зависимости выходной мощности и КПД от тока пучка гироклистрона, помещённого в поле этой конфигурации. Оптимизация распределения магнитного поля позволила повысить КПД при токе пучка 12 А почти вдвое (с 19 до 32 %) и за счёт этого увеличить максимальную пиковую мощность со 140 до 220 кВт. Ограничение КПД при фиксированном токе пучка обусловлено, как и в предыдущем варианте гироусилителя, самовозбуждением колебаний на частоте 93,2 ГГц. Максимальный КПД, равный 36 %, был реализован при токе пучка 8 А.

На рис. 3 представлены зависимости выходной мощности P и коэффициента усиления K_{yc} от мощности входного сигнала $P_{вх}$ при фиксированных значениях $U_0 = 60$ кВ, $I_0 \approx 7,2$ А и частоте

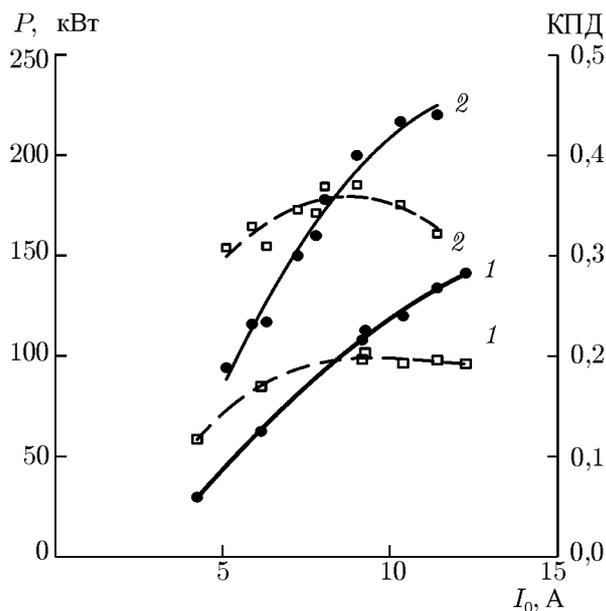


Рис. 2. Зависимости выходной мощности P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и КПД (квадратики, аппроксимация пунктиром) двухрезонаторного гироклистрона от тока электронного пучка I_0 при $U_0 = 60$ кВ, $P_{\text{вх}} = 1,2$ кВт и частоте входного сигнала $f = 93,2$ ГГц (кривая 1 — однородное распределение магнитного поля, кривая 2 — оптимальное распределение)

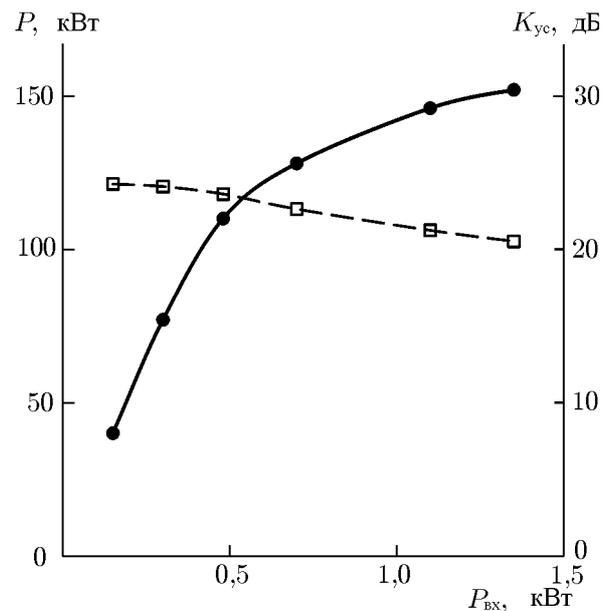


Рис. 3. Зависимости выходной мощности P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и коэффициента усиления K_{yc} (квадратики, аппроксимация пунктиром) двухрезонаторного гироклистрона от мощности входного сигнала $P_{\text{вх}}$ при $U_0 = 60$ кВ, $I_0 = 7,2$ А и $f = 93,2$ ГГц

$f \approx 93,22$ ГГц. С увеличением $P_{\text{вх}}$ выходная мощность монотонно возрастала, причём насыщение отсутствовало даже при максимальной входной мощности $P_{\text{вх макс}} \approx 1,4$ кВт. Коэффициент усиления на уровне выходной пиковой мощности 150 кВт составлял 20 дБ, а коэффициент усиления в режиме малого сигнала был равен 25 дБ.

Относительная ширина полосы усиливаемых частот гироклистрона $\Pi_{\text{yc}} = \Delta f/f$, определённая на половинном уровне выходной мощности (-3 дБ) и измеренная при $U_0 = 60$ кВ и $I_0 \approx 7,7$ А, была равна 0,15 %. Заметим, что ширина полосы пропускания «холодного» выходного резонатора $\Pi_3 = \Delta f/f_3^{(0)} = 1/Q_3$ составляет 0,18 %. Уменьшение Π_{yc} по сравнению с Π_3 связано с влиянием разброса электронов по скоростям на группировку пучка в пространстве дрейфа гироклистрона.

Повышение выходной мощности в этом усилителе путём увеличения ускоряющего напряжения или тока пучка оказалось невозможным, поскольку при напряжении выше 60 кВ и токах выше 12 А значительная часть электронов проходящего потока осаждалась на стенке неохлаждаемой трубки дрейфа. Такое оседание тока приводило к разогреву поверхности трубки дрейфа, ухудшению вакуума внутри прибора и высоковольтному пробое зазора между катодом и анодом электронной пушки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ТРЁХРЕЗОНАТОРНОГО ГИРОКЛИСТРОНА

Разработка трёхрезонаторного гироклистрона проводилась с целью повышения коэффициента усиления и расширения полосы усиливаемых частот по сравнению со значениями, достигнутыми в двухрезонаторном усилителе. В экспериментальном макете гироклистрона промежу-

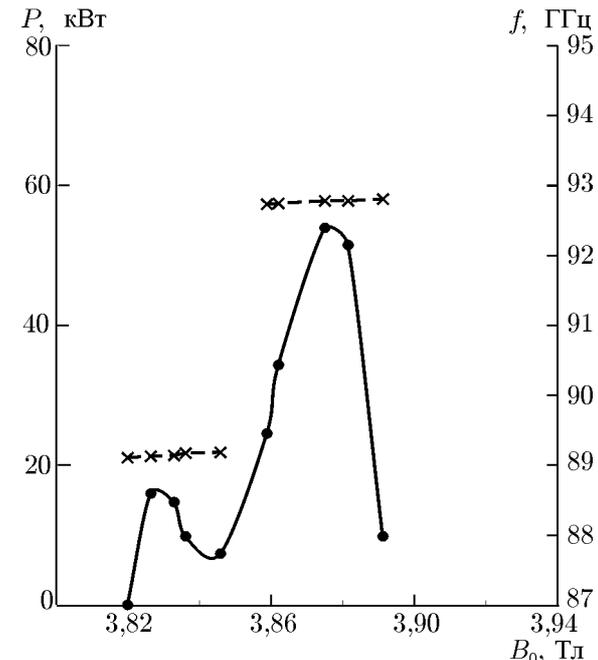
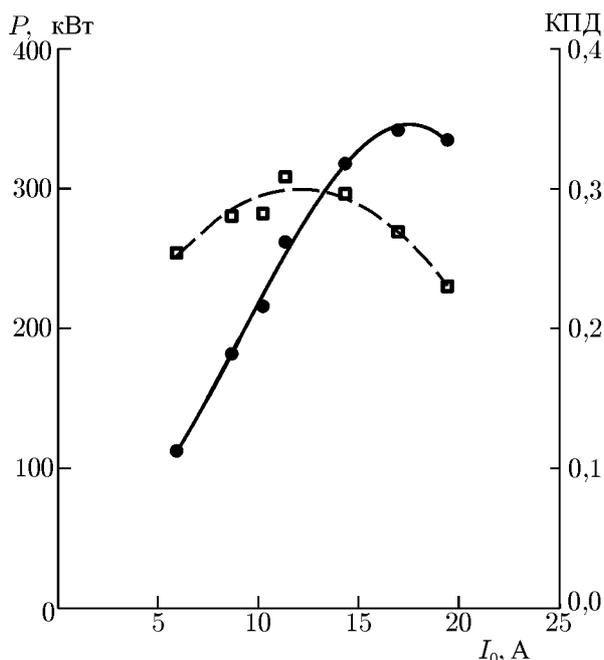


Рис. 4. Зависимости выходной мощности P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и КПД (квадратики, аппроксимация пунктиром) трёхрезонаторного гироклистрона от тока электронного пучка I_0 при $U_0 = 75$ кВ, $P_{вх} = 1,5$ кВт и $f = 93,2$ ГГц при оптимальном продольном распределении магнитного поля

Рис. 5. Зависимости мощности генерации P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и частоты генерируемых колебаний f (крестики, аппроксимация пунктиром) от величины магнитного поля основного соленоида B_0 при $U_0 = 70$ кВ и $I_0 = 11$ А

точный резонатор располагается эквидистантно между двумя другими резонаторами, а его собственная частота близка к частоте выходного резонатора. В этом случае коэффициент усиления приблизительно равен произведению коэффициентов усиления двух парциальных двухрезонаторных гироклистронов: «входной резонатор—первая трубка дрейфа—второй резонатор» и «средний резонатор—вторая трубка дрейфа—выходной резонатор» [12].

Для решения проблемы транспортировки пучка через пространство взаимодействия усилителя зазор между внешней границей пучка и внутренней поверхностью трубки дрейфа был увеличен за счёт уменьшения диаметра катода с 28 до 25 мм. При этом радиус пучка в области однородного магнитного поля уменьшился с 3,1 до 2,8 мм. Такая модификация электронной пушки позволила повысить ускоряющее напряжение до 75 кВ и увеличить расчётный ток электронной пушки до 25 А. В целях обеспечения устойчивой работы гироклистрона при повышенных ускоряющем напряжении и токе пучка в дальнейших экспериментах использовался выходной резонатор с пониженной добротностью $Q_3 = 375$ (см. вариант 2 в табл. 1). Оптимальная продольная структура статического магнитного поля гироклистрона совпадала с изображённой на рис. 1 кривой 2.

В трёхрезонаторном гироклистроне с добротностью промежуточного резонатора $Q_2 = 130$ (вариант 1 в табл. 2) на частоте 93,22 ГГц была достигнута наибольшая пиковая выходная мощность 340 кВт при КПД 26,7 %, ускоряющем напряжении $U_0 = 75$ кВ и токе пучка $I_0 \approx 17$ А (рис. 4). Максимальный КПД, равный 31 %, был реализован при токе пучка 11 А. Снижение выходной мощности при $I_0 > 17$ А было обусловлено возникновением высокочастотного разряда в выходном резонаторе из-за ухудшения в нём вакуума вследствие разогрева его внутренней поверхности за счёт омических потерь излучения. Это ограничение выходной мощности не является принципиальным и связано только с недостатками вакуумно-технологического состояния

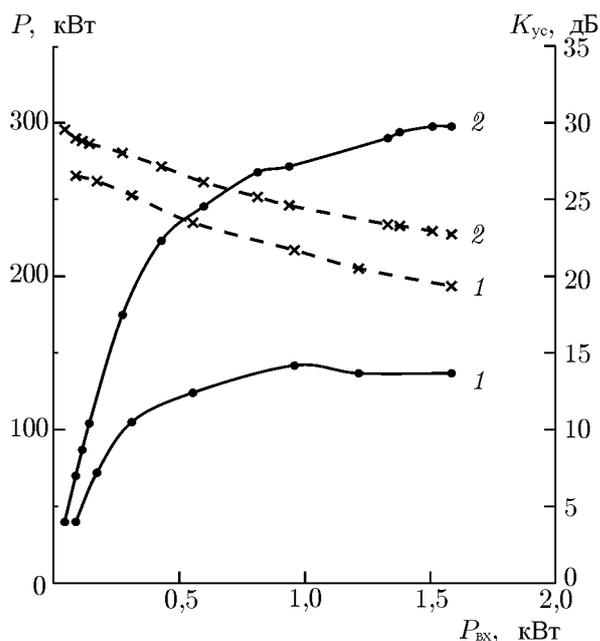


Рис. 6. Зависимости выходной мощности P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и коэффициента усиления K_{yc} (крестики, аппроксимация пунктиром) трёхрезонаторного гироклистрона с $Q_2 = 130$ от мощности входного сигнала $P_{вх}$ при $U_0 = 75$ кВ, $f = 93,2$ ГГц и токе пучка 10 А (кривая 1) и 18,2 А (кривая 2)

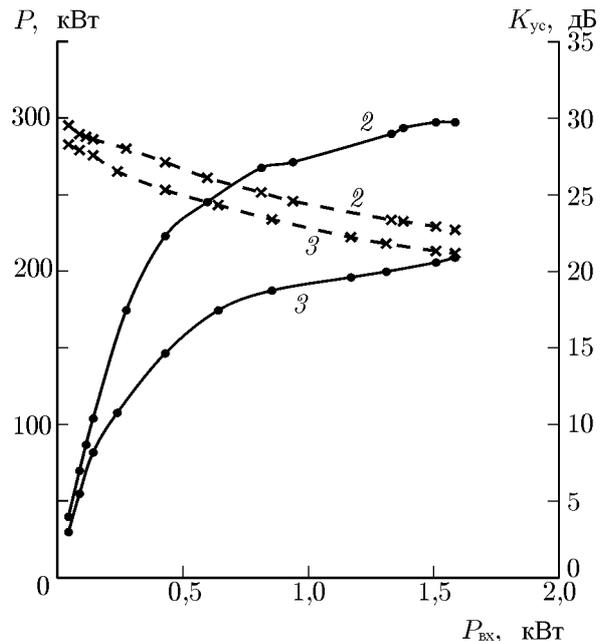


Рис. 7. Зависимости выходной мощности P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и коэффициента усиления K_{yc} (крестики, аппроксимация пунктиром) трёхрезонаторного гироклистрона от мощности входного сигнала $P_{вх}$ при различных значениях добротности среднего резонатора: кривая 2 — $Q_2 = 130$, $I_0 = 18,2$ А; кривая 3 — $Q_2 = 100$, $I_0 = 17,6$ А (в обоих случаях $U_0 = 75$ кВ, $f = 93,2$ ГГц)

экспериментального макета, работающего при непрерывной откачке газа. Решение данной проблемы лежит на пути совершенствовании вакуумной технологии и системы охлаждения отдельных узлов гироклистрона. По нашим оценкам, в отпаянном варианте рассматриваемого прибора наибольшая выходная мощность может достигать 400÷450 кВт.

Ограничение КПД и выходной мощности в области токов пучка $I_0 \leq 17$ А обусловлено, как и в двухрезонаторном гироклистроне, самовозбуждением колебаний на частоте 93,2 ГГц. На рис. 5 приведены зависимости мощности генерации P и частоты генерируемых колебаний f от индукции магнитного поля основного соленоида B_0 . Измерения проводились при $U_0 = 70$ кВ и $I_0 \approx 11$ А, неизменном поле на катоде и оптимальной по отношению к КПД конфигурации магнитного поля. Сопоставление измеренных и рассчитанных частот собственных колебаний резонаторов гироклистрона позволяет отождествить наблюдаемые в эксперименте зоны генерации с самовозбуждением в выходном резонаторе рабочей моды TE_{021} ($f \approx 93,2$ ГГц, $B_{0\text{макс}} \approx 3,875$ Тл) и нижней паразитной моды TE_{221} ($f \approx 89,4$ ГГц, $B_{0\text{макс}} \approx 3,825$ Тл). Максимум зоны усиления по магнитному полю при тех же значениях тока и напряжения пучка, частоте и мощности входного сигнала, равных соответственно 93,22 ГГц и 1,4 кВт, соответствовал $B_0 \approx 3,862$ Тл. Таким образом, нарушение устойчивости гироклистрона связано с самовозбуждением рабочего типа колебаний TE_{021} в выходном резонаторе.

На рис. 6 представлены зависимости выходной мощности P и коэффициента усиления K_{yc} от мощности входного сигнала $P_{вх}$ в гироклистроне с добротностью промежуточного резонатора $Q_2 = 130$, измеренные при токах пучка 10 А (кривые 1) и 18,2 А (кривые 2). Частота входного

сигнала $f \approx 93,22$ ГГц, ускоряющее напряжение пучка $U_0 = 75$ кВ, магнитные поля в рабочем пространстве и на катоде были фиксированы. Для того, чтобы исключить возможность самовозбуждения гироклистрона и возникновения сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда в выходном резонаторе, графики $P = P(P_{\text{вх}})$ и $K_{\text{ус}} = K_{\text{ус}}(P_{\text{вх}})$ измерялись при пониженном отношении скорости вращения электронов к их поступательной скорости на уровне мощности, соответствующей $0,85 \div 0,90$ от наибольшей выходной мощности при данном токе пучка (см. рис. 4).

Из вида приведённых зависимостей следует, что в случае $I_0 \approx 18,2$ А с увеличением мощности входного сигнала выходная мощность монотонно росла, достигая насыщения при $P_{\text{вх}}^{\text{нас}} \approx 1,3$ кВт (кривая 2). Коэффициент усиления при этом падал с 31,5 дБ до 22,7 дБ. При малом токе пучка $I_0 \approx 10$ А поведение зависимостей $P = P(P_{\text{вх}})$ и $K_{\text{ус}} = K_{\text{ус}}(P_{\text{вх}})$ в целом сохранялось, однако насыщение выходной мощности происходило уже при $P_{\text{вх}} \approx 1$ кВт. Тем не менее, по сравнению с предыдущим случаем коэффициент усиления снижался примерно на $2 \div 2,5$ дБ во всём диапазоне изменения входной мощности (кривая 1).

Увеличение $K_{\text{ус}}$ в области больших токов связано с улучшением группировки электронного пучка в области второго участка дрейфа, обусловленным возрастанием амплитуды высокочастотного (ВЧ) поля в промежуточном резонаторе вследствие увеличения отношения рабочего тока I_0 к минимальному стартовому току второго резонатора $I_{02\text{ст}}^{\text{мин}}$ [12].

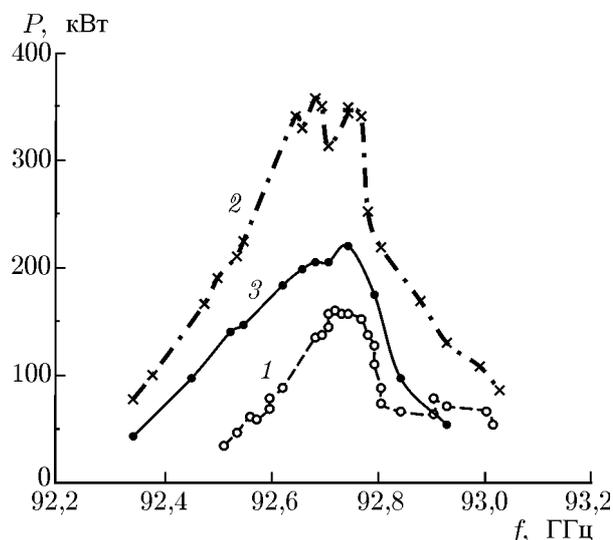


Рис. 8. Зависимости выходной мощности P трёх-резонаторного гироклистрона от частоты входного сигнала f при $U_0 = 75$ кВ, $P_{\text{вх}} = 1,3$ кВт и различных значениях тока пучка и добротности среднего резонатора: кривая 1 — $Q_2 = 130$, $I_0 = 10$ А (белые кружки, аппроксимация пунктиром); кривая 2 — $Q_2 = 130$, $I_0 = 18,2$ А (крестики, аппроксимация штрих-пунктиром); кривая 3 — $Q_2 = 100$, $I_0 = 17,6$ А (чёрные кружки, аппроксимация сплошной кривой)

Влияние на амплитудные характеристики гироклистрона добротности промежуточного резонатора иллюстрируется графиками на рис. 7. Зависимости $P = P(P_{\text{вх}})$ и $K_{\text{ус}} = K_{\text{ус}}(P_{\text{вх}})$ в гироусилителе с $Q_2 = 100$ были измерены при токе пучка 17,6 А, фиксированных $U_0 = 75$ кВ и $f \approx 93,22$ ГГц. Для сравнения на том же рисунке приведены аналогичные графики, полученные при $I_0 \approx 18,2$ А в гироклистроне с $Q_2 = 130$ (кривая 2 на рис. 6). Снижение добротности среднего резонатора сопровождается увеличением его минимального стартового тока, уменьшением отношения $I_0/I_{02\text{ст}}^{\text{мин}}$ и, как следствие, уменьшением амплитуды возбуждаемого в промежуточном резонаторе ВЧ поля. В этом случае модуляция электронного потока ВЧ полем второго резонатора заметно снижается, что приводит к уменьшению параметра группировки пучка на входе в третий резонатор. По этой причине в гироклистроне с низкодобротным средним резонатором пиковая выходная мощность падала до 215 кВт, а коэффициент усиления снижался на 2 дБ при любых значениях $P_{\text{вх}}$ в диапазоне $0,1 \div 1,6$ кВт (кривые 3).

На рис. 8 представлены зависимости выходной мощности P от частоты входного сигнала для двух вариантов гироклистронов, отличающихся добротностью промежуточного резонатора ($Q_2 = 100$ и 130), измеренные в тех же режимах, что и зависимости $P = P(P_{\text{вх}})$, приведённые на рис. 6 и 7 (при $I_0 \approx 10$ А (кривая 1) и $I_0 \approx 18,2$ А (кривая 2) в усилителе с $Q_2 = 130$, а в усилителе с $Q_2 = 100$ — при $I_0 \approx 17,6$ А (кривая 3)). Ускоряющее напряжение пучка было равно 75 кВ, а входная мощность составляла 1,5 кВт.

Кривые $P = P(f)$ имеют резонансный характер, причём во всех случаях положения их максимумов совпадают с частотой нагруженного пучком выходного резонатора $\tilde{f}_3 \approx 93,22$ ГГц, которая не слишком сильно отличается от его собственной частоты $f_3^{(0)} = 93,06$ ГГц.

В гироклистроне с $Q_2 = 130$ при токе $I_0 \approx 10$ А определённая на половинном уровне выходной мощности (-3 дБ) относительная ширина полосы усиления $\Pi_{yc} \approx 0,21$ % почти совпадает с шириной полосы «холодного» выходного резонатора $\Pi_3 = \Delta f / f_3^{(0)} = 1/Q_3 = 0,26$ % (кривая 1). С ростом тока пучка до 18,2 А полоса усиления возрастает до 0,41 %, что можно объяснить расширением полосы нагруженного пучком выходного резонатора $\tilde{\Pi}_3 = \Delta f / \tilde{f}_3$ и улучшением группировки электронного потока во всей полосе рабочих частот, которое, как уже отмечалось ранее, связано с возрастанием амплитуды ВЧ поля в среднем резонаторе (кривая 2). На частоте $f \approx \tilde{f}_3 \approx 93,22$ ГГц при $I_0 \approx 18,2$ А и $P_{вх} \approx 1,5$ кВт имеет место перегруппировка пучка, которая приводит к падению выходной мощности гироклистрона с 310 до 270 кВт.

Снижение добротности промежуточного резонатора приводит к сужению полосы усиления до 0,39 % (кривая 3), что свидетельствует о слабой зависимости Π_{yc} от Q_2 . Уменьшение ширины полосы гироклистрона с $Q_2 = 100$ происходит вследствие ухудшения группировки пучка на «крыльях» кривой $P = P(f)$, которое, в свою очередь, обусловлено уменьшением амплитуды ВЧ поля в промежуточном резонаторе. На частоте $f \approx \tilde{f}_3$ также наблюдается перегруппировка пучка, однако она выражена заметно слабее, чем в гироусилителе с $Q_2 = 130$, поскольку выходная мощность падает только с 220 до 208 кВт.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) В экспериментальном макете двухрезонаторного гироклистрона с рабочим типом колебаний в резонаторах ТЕ₀₂₁ на частоте 93,2 ГГц достигнута пиковая выходная мощность 220 кВт с КПД 32 %, коэффициентом усиления 20 дБ и полосой рабочих частот 0,15 % (140 МГц) при ускоряющем напряжении 60 кВ и токе пучка 12 А. Показано, что оптимизация продольного распределения статического магнитного поля в рабочем пространстве позволяет повысить КПД и выходную мощность усилителя в 1,7 раза по сравнению со случаем однородного распределения магнитного поля.

2) В трёхрезонаторном гироклистроне на той же частоте реализована наибольшая пиковая выходная мощность 340 кВт с КПД 27 %, коэффициентом усиления 23 дБ и полосой рабочих частот 0,41 % (380 МГц) при использовании электронного пучка с ускоряющим напряжением 75 кВ и током 17 А. Ограничение выходной мощности при больших токах связано с возникновением высокочастотного разряда в выходном резонаторе из-за ухудшения в нём вакуума вследствие разогрева внутренней поверхности резонатора за счёт омических потерь излучения. В отпаянном варианте гироклистрона пиковая выходная мощность может быть увеличена до 400÷450 кВт.

3) Ограничение выходной мощности и КПД при фиксированном токе пучка обусловлено самовозбуждением рабочего типа колебаний ТЕ₀₂₁ в выходном резонаторе.

4) В трёхрезонаторном гироклистроне имеет место сильная зависимость выходной мощности и коэффициента усиления от тока электронного пучка и добротности промежуточного резонатора. Ширина полосы рабочих частот монотонно растёт с увеличением тока пучка и слабо изменяется при изменении добротности среднего резонатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antakov I. I., Zasyrkin E. V., Sokolov E. V. // Conf. Digest 19th Int. Conf. IRMMW, Sendai, Japan, 17–20 October 1994. P. 37.
2. Antakov I. I., Zasyrkin E. V., Sokolov E. V. // Conf. Digest 18th Int. Conf. IRMMW, Colchester, UK, 6–10 September 1993. P. 466.
3. Danly B. G., Blank M., Calame J. P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, No. 3. P. 713.
4. Linde G. J., Ngo M. T., Danly B. G., et al. // IEEE Aerospace and Electronic Systems. 2008. V. 44, No. 3. P. 1102.
5. Ustoff J. M. // IEEE Aerospace and Electronic Systems. 2007. V. 43, No. 2. P. 664.
6. Blank M., Borchard P., Cauffman S., Felch K. // Conf. Digest Joint 32nd IRMMW Conf. and 15th Int. Conf. Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 3–7 September 2007. V. 1. P. 364.
7. Толкачев А. А., Левитан Б. А., Мясников В. Е. и др. // Радиолокация и связь. 2007. № 4. С. 3.
8. Garonov A. V. et al. // Int. J. Electronics. 1981. V. 51, No. 4. P. 277.
9. Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 4. С. 491.
10. Антаков И. И., Гачев И. Г., Засыркин Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 11. С. 1458.
11. Antakov I. I., Moiseev M. A., Sokolov E. V., Zasyrkin E. V. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1994. V. 15, No. 5. P. 873.
12. Zasyrkin E. V., Moiseev M. A., Sokolov E. V., Yulpatov V. K. // Int. J. Electronics. 1995. V. 78, No. 2. P. 423.
13. Антаков И. И., Гачев И. Г., Засыркин Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 3. С. 185.
14. Засыркин Е. В., Моисеев М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 10. С. 1321.
15. Zasyrkin E. V., Antakov I. I., Gachev I.G., et al. // Conf. Digest 23d Int. Conf. IRMMW, Colchester, UK, 7–11 September 1998. P. 323.

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.; принята в печать 30 мая 2012 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF A W-BAND GYROKLYSTRON AMPLIFIER OPERATED IN THE HIGH-ORDER TE_{021} CAVITY MODE

E. V. Zasyrkin, I. G. Gachev, and I. I. Antakov

We present experimental results for a 93.2 GHz gyrokystron amplifier operated in the high-order TE_{021} cavity mode in a cryomagnet. In a three-cavity gyrokystron, a peak output power of 340 kW with 27% efficiency, 23 dB saturated gain, and 0.41% (380 MHz) bandwidth was obtained with a 75 kV, 17 A electron beam. The output-power and efficiency restriction was due to the self-excitation of the TE_{021} operating mode in the output cavity. The influence of the electron beam current and intermediate cavity Q-factor on output characteristics of a three-cavity gyrokystron has been studied experimentally.