

УДК 621.385.69

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОКЛИСТРОНА, РАБОТАЮЩЕГО В ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

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

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Разработан и испытан гироклистрон на второй гармонике циклотронной частоты электронов, работающий на частоте 32,3 ГГц в поле постоянного магнита. В двух- и трёхрезонаторном варианте гироклистрона пиковая мощность выходного излучения достигала 320 кВт при КПД 20 %, коэффициенте усиления $20 \div 25$ дБ и ширине полосы рабочих частот 0,05 %. В широкополосном варианте гироклистрона полоса усиления составляла 0,27 % при выходной мощности 200 кВт и коэффициенте усиления 13 дБ.

ВВЕДЕНИЕ

Испытанный в 1967 году и описанный в [1] первый гироклистрон работал на частоте 10 ГГц, соответствующей частоте основного циклотронного резонанса в поле соленоида, охлаждаемого проточной водой. В последующем для радиолокационных станций миллиметрового диапазона длин волн «РУЗА» [2] и WARLOC [3] были разработаны гироклистроны [4, 5], помещаемые в криомагниты.

С точки зрения удобства эксплуатации криомагниты, очевидно, проигрывают постоянным магнитам, однако поля последних не превышают 1 Тл. По этой причине даже в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн гироклистроны с постоянными магнитами должны работать на второй гармонике гирочастоты электронов, что приводит к необходимости при умеренных рабочих напряжениях использовать существенно более добротные и длинные (по сравнению с применяемыми в гироусилителях на первой гармонике) резонаторы. Последнее неизбежно приводит к сужению ширины полосы усиливаемых частот.

Разработка гироклистрона на второй гармонике циклотронной частоты электронов впервые была выполнена фирмой «Varian» (США) в конце 70-х годов: был создан трёхрезонаторный гироусилитель с рабочей частотой 10 ГГц, выходной импульсной мощностью 20 кВт, КПД 8 % и коэффициентом усиления 10 дБ [6]. В начале 90-х годов в ИПФ РАН был разработан и исследован гироклистрон на второй гармонике гирочастоты, работавший на частоте 35 ГГц в магнитном поле с индукцией 0,7 Тл, создаваемом криомагнитом [7]. В процессе экспериментального исследования данного усилителя была достигнута импульсная мощность 260 кВт с КПД 18 %, коэффициентом усиления 17 дБ и полосой усиливаемых частот 0,1 %.

На основе представленных в [7] данных нами был спроектирован гироклистрон, работающий в поле постоянного магнита. Результаты его экспериментального исследования приводятся в настоящей статье.

1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНИТА И ГИРОКЛИСТРОНА

1.1. Магнитная система гироклистрона

Постоянный магнит для гироклистрона был рассчитан, разработан и изготовлен сотрудниками фирмы ООО «Элмаг» (г. Владимир). Магнит включает в себя три связанных между собой блока — катодный, центральный и коллекторный (рис. 1).

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

185

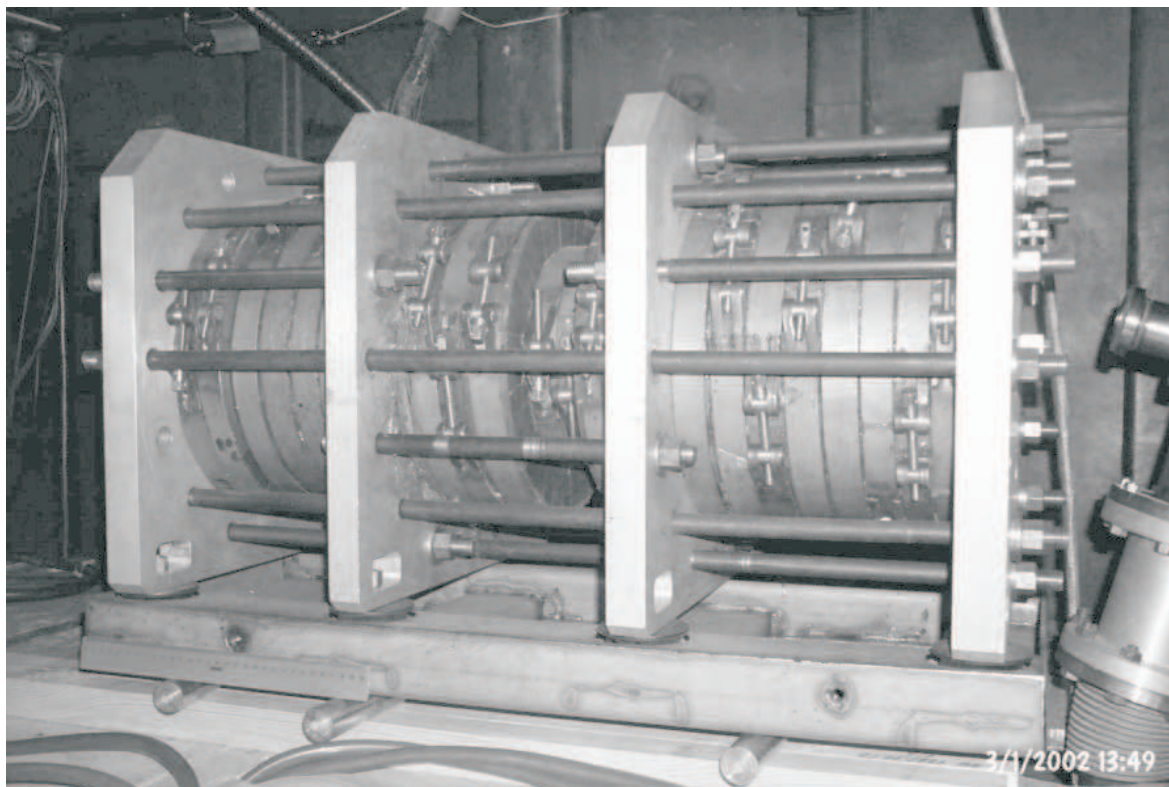


Рис. 1. Фотография постоянного магнита

Катодный и коллекторный блоки состоят из дисков с толщиной 30 мм и внешним диаметром 300 мм каждый, спечённых из порошка неодим—железо—бор и намагниченных в радиальном направлении. Внутренние диаметры катодного и коллекторного блоков равны 130 и 80 мм соответственно. Снаружи на диски надеваются бандажи в виде ленты из листовой нержавеющей стали со стягивающим устройством. Остаточная индукция диска после намагничивания равна 1,1 Тл.

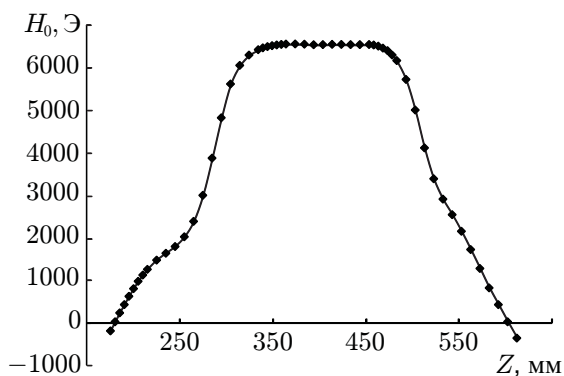


Рис. 2. Распределение продольной составляющей статического магнитного поля вдоль оси постоянного магнита (квадратики, аппроксимация сплошной кривой)

На рис. 2 представлено измеренное продольное распределение магнитного поля на оси магнита. Из него следует, что максимальное значение индукции магнитного поля равно $B_0 = 0,656$ Тл.

Основным элементом центрального блока, формирующего однородное магнитное поле, является аксиально-намагниченный цилиндр, который набирается из отдельных колец с толщиной 30 мм каждое. Внутренний диаметр цилиндра равен 60 мм, его внешний диаметр — 90 мм, длина — 210 мм. Для предотвращения рассеяния магнитного потока с наружной поверхности цилиндра на него надеваются диски с радиальной намагниченностью, большинство из которых имеет внешний диаметр 300 мм. Два диска с диаметром 210 мм предназначены для коррекции магнитного поля в центральной части магнита (рис. 1). Общий вес магнита, включая арматуру, составляет 360 кг.

При таком значении магнитного поля частота второй гармоники циклотронного вращения электронов равна 32,3 ГГц. Поэтому рабочая частота гироклистрона была выбрана вблизи этого значения. Длина участка однородного магнитного поля равна 138 мм на уровне 0,99 от максимального значения B_0 . Значения крутизны изменений магнитных полей на катоде и на коллекторе электронов равны 130 Э/см и 150 Э/см соответственно. Как следует из расчётов, при этих условиях адиабатичность движения электронов в магнетронно-инжекционной пушке и на коллекторе сохраняется. Максимального значения, равного 950 Э/см, крутизна изменения поля достигает в области компрессии электронного пучка. Точки реверса магнитного поля, в которых оно меняет своё направление, расположены следующим образом: с катодной стороны — на расстоянии 220 мм от центра магнита, а со стороны коллектора — на расстоянии 200 мм.

Наряду с постоянным магнитом в состав магнитной системы входят четыре соленоида, подключённые к независимым источникам, и магнитные экраны в виде втулок из мягкой стали 03-ВД. Соленоид 1, расположенный на катоде электронной пушки, предназначен для регулирования пич-фактора электронного пучка. Дополнительные соленоиды 2, 3, 4, намотанные на корпус лампы, и магнитные экраны, находящиеся в вакуумном объёме гироклистрона и охватывающие резонаторы снаружи, использовались для формирования оптимальной продольной структуры статического магнитного поля в пространстве взаимодействия.

1.2. Электронно-оптическая и электродинамическая системы гироклистрона

Для формирования трубчатого винтового электронного потока используется трёхэлектродная магнетронно-инжекционная пушка, рассчитанная на работу в импульсном режиме с ускоряющим напряжением $65 \div 70$ кВ, анодным напряжением 38 кВ и силой тока пучка до 25 А. Длительность импульсов напряжения и тока равна 150 мкс. Аксиальный профиль электронной пушки представлен на рис. 3. Диаметр катода равен 32 мм, а диаметр электронного пучка в пространстве взаимодействия — 8,8 мм. Расчётные значения пич-фактора пучка и относительного разброса вращательных скоростей электронов при ускоряющем напряжении 70 кВ и силе тока 20 А составляют $g_0 = 1,1$ и $\delta\beta_{\perp} = 23\%$ соответственно.

Как и в гироклистроне, описанном в [7], электронная пушка сопряжена с системой дифракционного возбуждения входного резонатора. Волна TE_{01} запитывающего волновода, проходящего через отверстие в катоде, преобразуется при помощи зеркального трансформатора в волну TE_{02} , распространяющуюся во входном волноводе и возбуждающую через диафрагму связи рабочий тип колебаний TE_{021} в первом резонаторе. В процессе расчётов определялись оптимальные с точки зрения трансформации мод размеры запитывающего и входного волноводов, а также профиль и размеры зеркала преобразователя. Дополнительными требованиями, которые необходимо было учитывать при оптимизации входного устройства являются: а) отсутствие статических пробоев между элементами устройства, находящимися под различными потенциалами; б) обеспечение беспрепятственного прохождения электронов че-

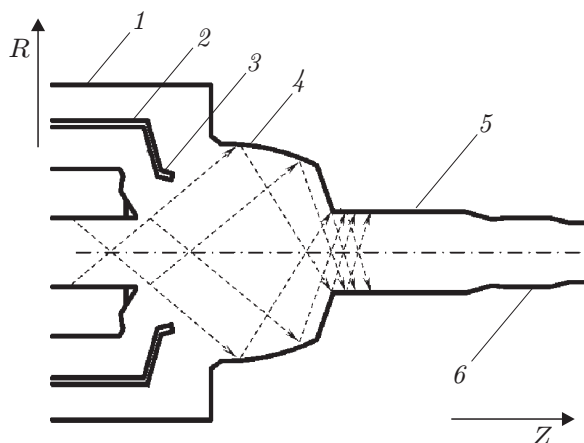


Рис. 3. Аксиальный профиль магнетронно-инжекционной пушки и входного устройства гироклистрона в области дрейфа электронного пучка: 1 — корпус, 2 — анод, 3 — катод, 4 — зеркало, 5 — входной волновод, 6 — выходной резонатор

рез пространство дрейфа пучка; в) слабое влияние на качество пучка полей электрических линз, образованных зазорами между катодом и анодом и катодом и зеркалом трансформатора. На основании результатов расчётов был синтезирован оптимальный профиль входного устройства, обеспечивающий коэффициент преобразования волн 55 % в совокупности с приемлемыми для работы гироклистрона качеством электронного пучка и электропрочностью (рис. 3).

Распространяющаяся во входном волноводе волна TE_{02} возбуждает через диафрагму связи рабочий тип колебаний TE_{021} в первом резонаторе. Длина регулярной части резонатора равна 16 мм. В эксперименте использовались различные резонаторы с добротностью $Q_{вх}$, изменяющейся в пределах $130 \div 750$. Собственные частоты резонаторов $f_{вх}^{(0)}$ менялись в диапазоне от 32,25 до 32,30 ГГц.

Выходной резонатор представляет собой отрезок регулярного волновода кругового сечения, ограниченный с одной стороны закритической для рабочего типа колебаний трубкой дрейфа, а с другой — диафрагмой, связывающей его с выходным волноводом расширенного сечения. Расчётные значения собственной частоты и нагруженной добротности резонатора в ходе эксперимента изменялись в пределах $32,27 \text{ ГГц} \leq f_{вых}^{(0)} \leq 32,30 \text{ ГГц}$ и $500 \leq Q_{вых} \leq 1050$.

Трубка дрейфа гироклистрона набирается из цилиндрических колец, изготовленных из нержавеющей стали, на внутренней поверхности которых размещаются радиально ориентированные металлические штыри. Штыревая конструкция обеспечивает рассеяние паразитных колебаний, возникающих в трубке дрейфа на бегущих волнах и на частотах, близких к критическим, в низшие типы волн с дальнейшим их распространением к входу и выходу гироклистрона.

Для повышения коэффициента усиления в гироклистроне используется промежуточный (средний) резонатор, расположенный эквидистантно относительно двух других резонаторов. Длина его регулярной части равна 15 мм, а собственная частота — 32,25 ГГц. С катодной стороны резонатор ограничен плавным конусным переходом, практически полностью исключаящим проникновение в него волны рабочего типа, а со стороны коллектора — закритической диафрагмой, длина и диаметр которой подбираются таким образом, чтобы обеспечить расчётное значение добротности резонатора $Q_{ср} = 450$. Через диафрагму энергия в виде волны TE_{02} излучается из резонатора в пространство дрейфа и затем рассеивается на металлических штырях в волны TE - и TM -типов с азимутальными индексами, отличными от нуля. В этом заключается принципиальное отличие среднего резонатора от промежуточного резонатора традиционной конструкции (см., например, [8]). Последний характеризуется отсутствием дифракционных потерь для рабочей моды и имеет низкую добротность за счёт диссипации части запасённой энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) поля в находящемся внутри него распределённом или объёмном поглотителе (резистивной нагрузке). Основным недостатком резонатора традиционной конструкции является перегрев резистивной нагрузки при больших уровнях мощности выходного излучения. В предлагаемой конструкции средний резонатор не содержит в себе поглотителя, что делает его привлекательным для использования в составе электродинамических систем мощных многорезонаторных гироклистронов, работающих в непрерывном режиме или в режимах с большой средней мощностью. Вместе с тем очевидным недостатком такой конструкции является возможность возникновения паразитной генерации на рабочем типе колебаний за счёт обратной связи между резонаторами.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально были исследованы выходные характеристики трёх вариантов гироклистронов:

1) двухрезонаторного гироклистрона с резонаторами, настроенными на одну частоту (синхронные резонаторы);

- 2) трёхрезонаторного гироклистрона с синхронными резонаторами;
- 3) двухрезонаторного гироклистрона с расстроенными резонаторами.

В процессе экспериментов была выполнена оптимизация резонаторов электродинамической системы и продольной структуры статического магнитного поля в рабочем пространстве. Особое внимание было уделено выяснению причин ограничения выходной мощности, КПД, коэффициента усиления и ширины полосы частот в приборах этого типа.

2.1. Двухрезонаторный гироклистрон с синхронными резонаторами

Для достижения выходной импульсной мощности гироусилителя в несколько сотен киловатт в сочетании с высоким КПД и большим коэффициентом усиления в этом варианте гироклистрона оба резонатора настраивались практически на одну и ту же частоту, а добротность выходного резонатора выбиралась достаточно большой. Расчётные значения собственных частот и добротностей резонаторов были равны $f_{\text{вх}}^{(0)} = 32,25$ ГГц, $Q_{\text{вх}} = 600$, $f_{\text{вых}}^{(0)} = 32,27$ ГГц, $Q_{\text{вых}} = 1\,050$.

В гироклистроне была достигнута пиковая мощность выходного излучения 320 кВт при длительности импульса 100 мкс с КПД, равным 21 %, при ускоряющем напряжении 65 кВ и силе тока пучка 23,8 А, близким к расчётным значениям для используемой электронной пушки (рис. 4). Максимальный КПД, равный 25 %, был достигнут при силе тока пучка 14 А. Ограничение мощности выходного излучения и КПД полученными значениями было обусловлено возникновением самовозбуждения на частоте, близкой к собственной частоте нагруженного пучком выходного резонатора.

На рис. 5 представлены зависимости мощности выходного излучения P и коэффициента усиления $K_{\text{ус}}$ от мощности входного сигнала $P_{\text{вх}}$ при фиксированных значениях напряжения $U_0 = 65$ кВ, силы тока пучка $I = 15$ А и частоты входного сигнала $f = 32,32$ ГГц. Гироклистрон

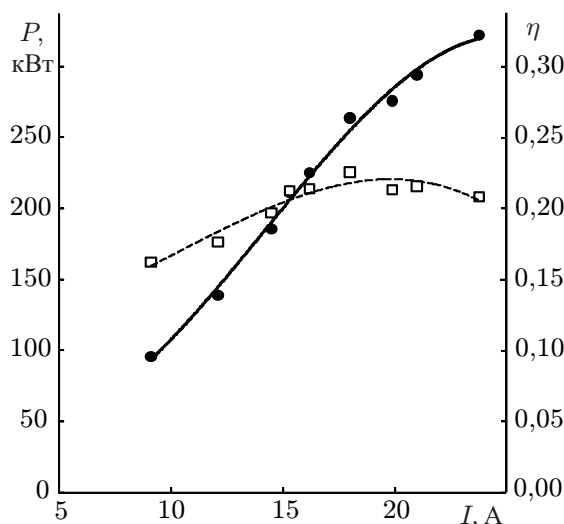


Рис. 4. Зависимости мощности выходного излучения P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и КПД η (квадратики, аппроксимация пунктиром) двухрезонаторного гироклистрона с синхронными резонаторами от силы тока электронного пучка при $U_0 = 65$ кВ, $P_{\text{вх}} = 4$ кВт и частоте входного сигнала $f = 32,32$ ГГц

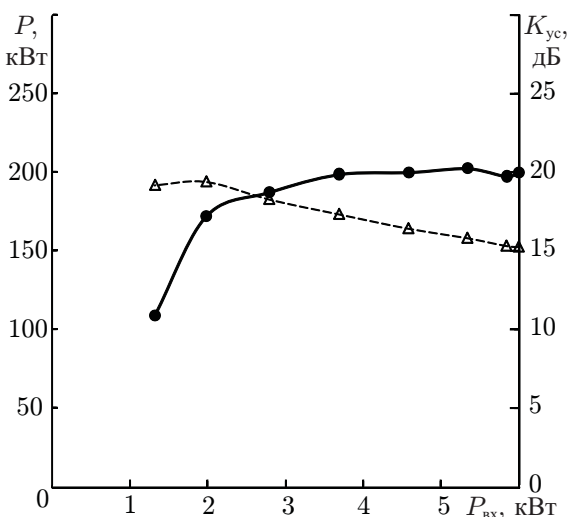


Рис. 5. Зависимость мощности выходного излучения P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и коэффициента усиления $K_{\text{ус}}$ (треугольники, аппроксимация пунктиром) от мощности входного сигнала $P_{\text{вх}}$ для двухрезонаторного гироклистрона с синхронными резонаторами при $U_0 = 65$ кВ, $I = 15,5$ А и $f = 32,32$ ГГц

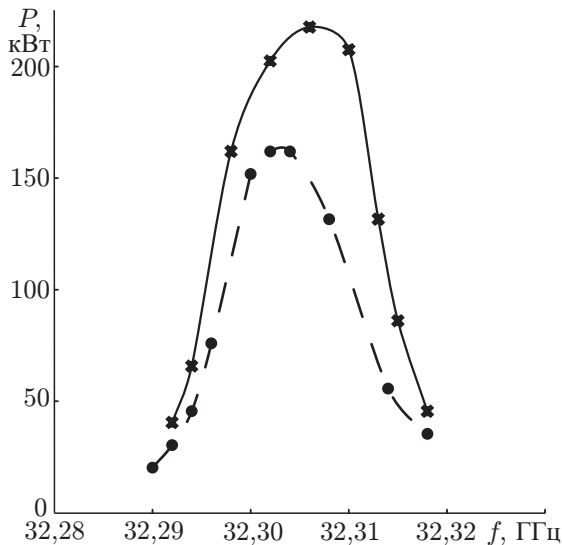


Рис. 6. Зависимости мощности выходного излучения от частоты входного сигнала f для двухрезонаторного гироклистрона с синхронными резонаторами с $f_{\text{вх}}^{(0)} = 32,27$ ГГц, $Q_{\text{вх}} = 600$, $f_{\text{вых}}^{(0)} = 32,27$ ГГц, $Q_{\text{вых}} = 1050$ при двух значениях силы тока электронного пучка: звёздочки, аппроксимация сплошной кривой — $I = 15,8$ А; кружки, аппроксимация пунктирной кривой — $I = 13,2$ А. Ускоряющее напряжение $U_0 = 65$ кВ, мощность входного сигнала $P_{\text{вх}} = 4$ кВт

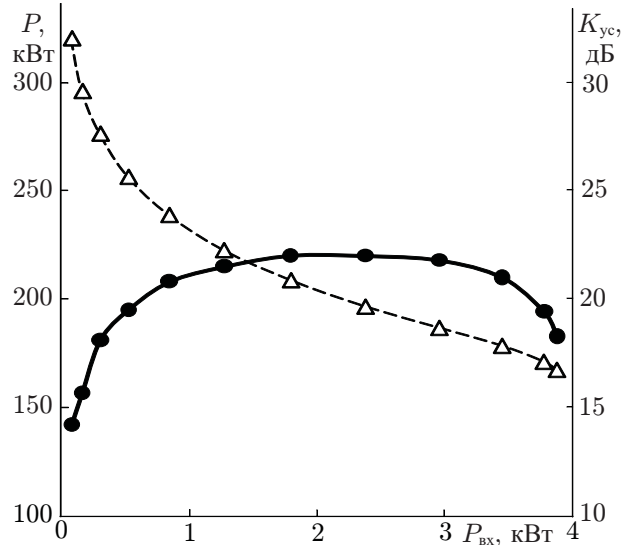


Рис. 7. Зависимости мощности выходного излучения P (кружки, аппроксимация сплошной кривой) и коэффициента усиления K_{yc} (треугольники, аппроксимация пунктиром) от мощности входного сигнала для трёхрезонаторного гироклистрона с синхронными резонаторами при $U_0 = 65$ кВ, $I = 16,2$ А и $f = 32,32$ ГГц

переходил в режим насыщения при входной мощности 3 кВт; коэффициент усиления $K_{\text{yc}}^{\text{нас}}$ при этом равнялся 18 дБ. Максимальный измеренный коэффициент усиления был равен 20 дБ.

Ширина полосы усиливаемых частот в данном варианте гироклистрона определяется, главным образом, шириной полосы пропускания наиболее добротного каскада, которым является выходной. Вследствие синхронной настройки резонаторов и высокой добротности выходного резонатора полоса усиления Δf , измеренная на уровне -3 дБ, равнялась лишь 16 МГц, т. е. $P_{\text{yc}} = \Delta f/f \approx 1/(2Q_{\text{вых}}) \approx 0,05\%$ (рис. 6).

2.2. Трёхрезонаторный гироклистрон с синхронными резонаторами

Для повышения коэффициента усиления гироклистрона используется средний (промежуточный) резонатор, расположенный эквидистантно относительно двух других резонаторов. При этом полная длина электродинамической системы, определяемая протяжённостью однородного участка магнитного поля постоянного магнита, остаётся неизменной. Собственная частота среднего резонатора $f_{\text{ср}}^{(0)} = 32,25$ ГГц, она совпадает с частотой входного резонатора $f_{\text{вх}}^{(0)} = 32,25$ ГГц и близка к частоте выходного резонатора $f_{\text{вых}}^{(0)} = 32,27$ ГГц. В этих условиях в трёхрезонаторном гироклистроне реализуется режим максимального усиления [7]. Добротность среднего резонатора равна $Q_{\text{ср}} = 450$, добротности двух других резонаторов те же, что и в двухрезонаторном усилителе, т. е. $Q_{\text{вх}} = 600$, $Q_{\text{вых}} = 1050$.

На рис. 7 приведены зависимости мощности выходного излучения и коэффициента усиления трёхрезонаторного гироклистрона от мощности входного сигнала, измеренные при $U_0 = 65$ кВ, $I = 15$ А и $f = 32,32$ ГГц. Из его сопоставления с графиками $P(P_{\text{вх}})$ и $K_{\text{yc}}(P_{\text{вх}})$ для двухре-

зонаторного гироклистрона с той же протяжённостью рабочего пространства, представленными на рис. 5, видно, что использование двухкаскадного группирователя позволяет значительно повысить коэффициент усиления. Насыщение усилителя наступало при входной мощности $P_{\text{вх}}^{\text{нас}} = 0,5$ кВт (при этом $K_{\text{ус}}^{\text{нас}} \approx 26$ дБ), в режиме насыщения отличие соответствующих значений $K_{\text{ус}}$ составляло 8 дБ, а в области малых $P_{\text{вх}}$, т. е. при $P_{\text{вх}} \ll P_{\text{вх}}^{\text{нас}}$, достигало 12 дБ.

В трёхрезонаторном гироусилителе была достигнута максимальная мощность выходного излучения 300 кВт при КПД 23 % и силе тока пучка 20 А. Ширина полосы усиления, составляющая 15 МГц ($P_{\text{ус}} \approx 0,046$ %), практически полностью совпадает с $P_{\text{ус}} \approx 0,05$ % для двухкаскадного усилителя.

2.3. Двухрезонаторный гироклистрон с расстроенными резонаторами

Исследование возможности увеличения полосы рабочих частот гироклистрона проводилось в двухрезонаторном варианте усилителя. Для этого добротность выходного резонатора была уменьшена до 500, а его собственная частота была повышена до 32,30 ГГц. В качестве входного каскада вначале использовался резонатор с $f_{\text{вх}}^{(0)} = 32,25$ ГГц и $Q_{\text{вх}} = 600$.

Зависимость мощности выходного излучения от частоты входного сигнала, измеренная при $U_0 = 60$ кВ, $I = 13,8$ А и $P_{\text{вх}} = 6$ кВт (сплошная кривая на рис. 8), радикальным образом отличается от представленной на рис. 6. В частности, функция $P(f)$ распадается на две отдельные кривые с максимумами, совпадающими с собственными частотами нагруженного пучком входного ($32,295 \div 32,300$ ГГц) и выходного ($32,345 \div 32,500$ ГГц) резонаторов.

Низкочастотный максимум соответствует оптимальной группировке пучка, модулируемого входным резонатором, который работает в нерегенеративном режиме. В этом режиме электронный поток модулируется не только высокочастотным полем внешнего сигнала, но и переменным полем, возбуждаемым в резонаторе самим пучком. Для реализации нерегенеративного режима усиления необходимо, чтобы первый резонатор имел достаточно большую длину порядка $(2,5 \div 3) \lambda$ (где λ — длина волны выходного излучения), а угол пролёта электронов в нём был существенно положительным. Последнее условие означает, что величина статического магнитного поля во входном резонаторе должна быть на несколько процентов меньше значения магнитного поля в области трубки дрейфа. Высокочастотный (правый) максимум на кривой $P(f)$ соответствует оптимальному отбору энергии у предварительно сгруппированного электронного потока в выходном резонаторе.

Видно, что в исследованном гироклистроне режимы оптимальной группировки пучка и оптимального отбора энергии сильно разнесены по частотам, а полоса группирователя является достаточно узкой вследствие высокой добротности первого резонатора. В силу этих причин параметр группировки пучка на собственной частоте нагруженного пучком второго резонатора, равной 32,35 ГГц, существенно отличается от своего оптимального значения $X = 1,84$. Поэтому значение мощности выходного излучения в правом максимуме в два раза меньше мощности в левом максимуме. В минимуме кривой $P(f)$ мощность выходного излучения составляла всего 50 кВт, что ниже уровня -3 дБ от максимальной мощности. Тем не менее, достигнутая для этого варианта усилителя ширина полосы усиления, равная 31 МГц (что составляет примерно 0,1 % центральной частоты), почти в два раза превышает соответствующее значение $P_{\text{ус}}$ для гироклистрона с $f_{\text{вх}}^{(0)} = f_{\text{вых}}^{(0)}$ и $Q_{\text{вых}} = 1050$. Следует, однако, отметить, что расширение полосы усиления достигается при одновременном снижении коэффициента усиления в насыщенном режиме с 18 до 15 дБ.

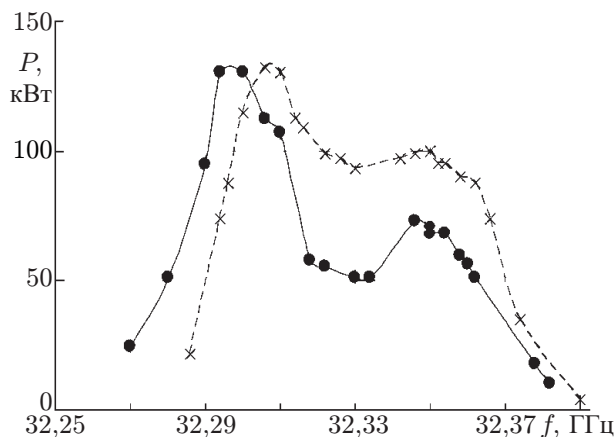


Рис. 8. Зависимость мощности выходного излучения от частоты входного сигнала f для двухрезонаторного гироклистрона с расстроенными резонаторами при $U_0 = 65$ кВ, $I = 13,8$ А, $P_{\text{вх}} = 8$ кВт: кружки, аппроксимация сплошной кривой — $f_{\text{вх}}^{(0)} = 32,25$ ГГц, $Q_{\text{вх}} = 600$; крестики, аппроксимация пунктирной кривой — $f_{\text{вх}}^{(0)} = 32,27$ ГГц, $Q_{\text{вх}} = 130$. Собственная частота выходного резонатора равна 32,3 ГГц, его добротность — 500

эффективную группировку пучка в окрестности собственной частоты нагруженного пучком выходного резонатора, вследствие чего значения мощности выходного излучения в обоих максимумах практически сравнялись, а глубина провала значительно уменьшилась. В этом варианте гироклистрона была достигнута максимальная ширина полосы усиления, равная 83 МГц, что составляет примерно 0,27 % центральной частоты, которая более, чем в 5 раз превышает $\Pi_{\text{ус}}$ гироклистрона с синхронной настройкой резонаторов. Однако, вследствие существенного уменьшения амплитуды переменного поля в первом резонаторе, вызванного снижением его добротности, расширение полосы рабочих частот сопровождалось заметным уменьшением коэффициента усиления гироклистрона с 18 до 13 дБ.

Снижение максимальной мощности выходного излучения и КПД гироклистрона с более низкодобротными резонаторами обусловлено, главным образом, невозможностью при реально достижимом в эксперименте качестве электронного потока обеспечить оптимальные условия отбора энергии у пучка в выходном резонаторе. Тем не менее, в гироусилителе была достигнута наибольшая пиковая мощность выходного излучения 220 кВт с КПД 18 % при ускоряющем напряжении пучка 65 кВ и силе тока 19 А. Максимальный КПД, равный 20 %, был достигнут при силе тока пучка 12 А.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследованы три варианта гироклистрона с рабочей частотой 32,3 ГГц, отличающиеся числом резонаторов, их добротностью и расстройкой собственных частот (см. табл. 1).

1) В двухрезонаторном гироклистроне с относительно высокодобротными и синхронными резонаторами достигнута наибольшая пиковая мощность выходного излучения при сравнительно небольшом коэффициенте усиления. Вследствие высокой добротности выходного резонатора по-

В гироклистроне с расстроенными резонаторами, имеющими добротности порядка 500÷600, ширина полосы усиливаемых частот ограничивается не полосой пропускания выходного каскада, а полосой группирователя и расстройкой собственных частот. В связи с этим для дальнейшего расширения полосы усиления представляется целесообразным уменьшить расстройку «холодных» частот резонаторов с 50 до 25÷30 МГц и снизить добротность первого резонатора до 120÷150. Поэтому дальнейшие исследования проводились с гироклистроном, в котором в качестве входного использовался резонатор с расчётными значениями собственной частоты $f_{\text{вх}}^{(0)} = 32,27$ ГГц и добротности $Q_{\text{вх}} = 130$. На рис. 8 представлены результаты измерений (штриховая кривая), полученные при тех же значениях напряжения и тока пучка, что и сплошная кривая, но при большей входной мощности $P_{\text{вх}} = 8$ кВт ($K_{\text{ус}}^{\text{нас}} \approx 13$ дБ). Как и ожидалось, уменьшение расстройки частот резонаторов и добротности входного резонатора позволило обеспечить

Таблица 1

Тип гироклистрона	Пиковая мощность выходного излучения, кВт	КПД, %	Коэффициент усиления, дБ	Ширина полосы усиления, МГц
1) Двухрезонаторный гироклистрон с синхронными резонаторами	320	22	18	16
2) Трёхрезонаторный гироклистрон с синхронными резонаторами	300	23	26	15
3) Двухрезонаторный гироклистрон с расстроенными резонаторами	220	18	13	83

лоса усиливаемых частот была относительно узка.

2) Введением в этот усилитель промежуточного резонатора, эквидистантного двум другим, удалось повысить коэффициент усиления более, чем в шесть раз при сохранении мощности выходного излучения и ширины полосы усиления на тех же уровнях, что и в предыдущем варианте гироклистрона.

3) Уменьшением добротностей резонаторов и оптимизацией расстройки их собственных частот полоса усиления была существенно расширена при относительно небольшом снижении выходной мощности, КПД и коэффициента усиления.

Дальнейшее улучшение выходных параметров гироклистрона, как по отдельности, так и в комплексе, возможно за счёт дополнительной оптимизации электродинамической системы и повышения качества электронного пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andronov A. A., Flyagin V. A., Gaponov A. V., et al. // Infrared Physics. 1978. V. 18, No. 5–6. P. 385.
2. Tolkachev A., Levitan B., Solovjev G., et al. // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2000. V. 15, No. 7. P. 25.
3. Linde G. J., Ngo M. T., Danly B. G., et al. // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2008. V. 44, No. 3. P. 1102.
4. Толкачев А. А., Левитан Б. А., Мясников В. Е. и др. // Радиолокация и связь. 2007. № 4. С. 3.
5. Danly B. G., Blank M., Calame J. P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, No. 3. P. 713.
6. Jory H. R. Millimeter wave gyrotron development phase I: Tech. Rep. RADC-TR-77-210 of Rome Air Development Center, Griffiss AFB. Rome, 1977.
7. Zasyrkin E. V., Moiseev M. A., Gachev I. G., Antakov I. I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24, No. 3. P. 666.
8. Garven M., Calame J. P., Nguen K. T., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28, No. 3. P. 672.
9. Zasyrkin E. V., Moiseev M. A., Sokolov E. V., Yulpatov V. K. // Int. J. Electronics. 1995. V. 78, No. 2. P. 423.

Поступила в редакцию 1 февраля 2011 г.; принята в печать 29 марта 2011 г.

EXPERIMENTAL STUDIES OF A GYROKLYSTRON OPERATING IN THE FIELD OF A PERMANENT MAGNET

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

We have developed and tested a gyrokystron operating with the second harmonic of the electron cyclotron frequency at a frequency of 32.3 GHz in the field of a permanent magnet. In the two- and three-cavity versions of the gyrokystron, the peak power of the output radiation reached 320 kW with an efficiency of 30%, an amplification coefficient of 20–25 dB, and an operating frequency bandwidth of 0.05%. In the wide-band version of the gyrokystron, the amplification bandwidth was equal to 0.27% for an output power of 200 kW and an amplification coefficient of 13 dB.