

УДК 533.9.08

МНОГОСТВОЛЬНЫЕ ГИРОТРОНЫ

В. Е. Запевалов, А. С. Зувев, А. Н. Куфтин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Предложена принципиально новая схема многоствольного гиротрона. В качестве примера рассмотрены три перспективных варианта реализации такой схемы с частотой генерации около 140 ГГц или кратной ей в случае работы на высоких циклотронных гармониках. Обсуждается вариант многоствольного гиротрона с широкой непрерывной перестройкой частоты около 13,1 ГГц. Рассмотрена возможность работы гиротрона данного типа на третьей циклотронной гармонике с суммарной мощностью выходного излучения более 1 кВт на частоте 448 ГГц.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из перспективных приборов высокочастотной вакуумной электроники больших мощностей являются гиротроны [1, 2], которые хорошо известны как источники микроволнового излучения с большой и средней мощностью. Эти представители мазеров на циклотронном резонансе охватывают широкий диапазон частот ($10 \text{ ГГц} \div 1 \text{ ТГц}$) и применяются в самых разнообразных приложениях [3–5]. Например, гиротроны мегаваттного уровня мощности активно используются в установках термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы [6]. Гиротроны терагерцового диапазона применяются для диагностики и спектроскопии различных сред, в различных медико-биологических задачах, для выявления взрывчатых и других запрещённых веществ и во множестве других приложений [7, 8].

Из всего многообразия гиросприборов наиболее распространён канонический гиротрон, который состоит из магнетронно-инжекторной пушки, формирующей трубчатый винтовой электронный пучок с компрессией в нарастающем сильном магнитном поле; аксиально-симметричного резонатора, где происходит электронно-волновое взаимодействие; коллектора, на который оседает отработанный электронный пучок, и системы вывода излучения, квазиоптической с волновым пучком или осевой на рабочей моде. В настоящее время подавляющее большинство промышленно выпускаемых гиротронов имеют канонический вид, но всё больший интерес вызывают и неканонические гиротроны [9]. Причиной этого, с одной стороны, является ограниченность возможностей традиционных методов селекции мод, которых иногда недостаточно для реализации стабильной одномодовой генерации, особенно при работе на гармониках гирочастоты. С другой стороны, уникальные свойства неканонических гиротронов существенно расширяют возможности приборов гиротронного типа и открывают новые перспективы для высокочастотной вакуумной электроники.

Примером неканонических гиротронов являются многолучевые гиротроны [10–14]. Впервые они были предложены ещё в 1980 году как один из способов увеличения селекции мод по поперечному индексу и повышению мощности выходного излучения [10, 11]. В настоящий момент прослеживается заметный рост интереса к этим приборам [13–15]. Как правило, дополнительный электронный пучок в гиротронах используется для эффективной селекции рабочего типа колебаний (см., например, [12]), но возможны и другие варианты использования электронных пучков в многолучевых системах [13, 15]. Например, в таких системах возможна многочастотная одновременная генерация на близких друг к другу частотах [13]. Следует отметить, что в качестве

* Alan.zuev@yandex.ru

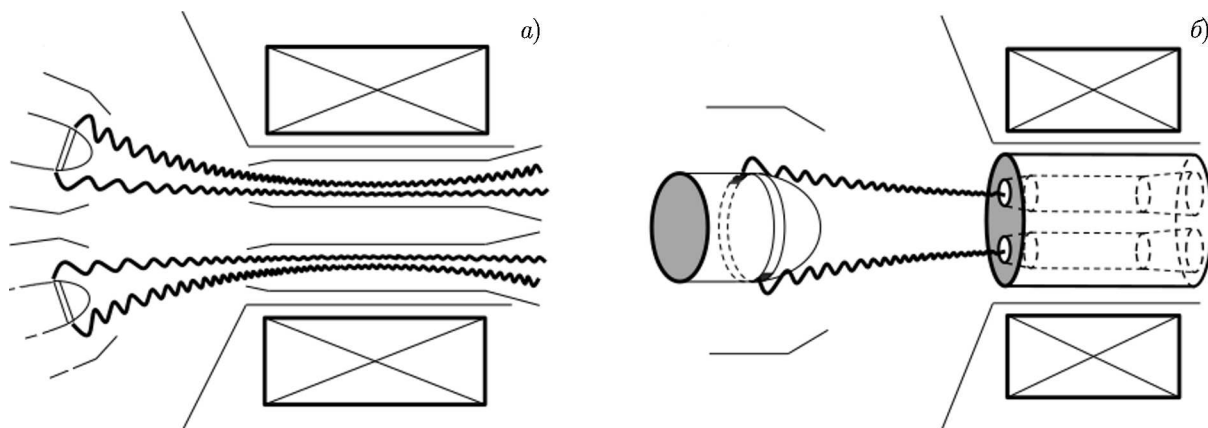


Рис. 1. Два примера возможных схем многоствольного гиротрона

многолучевой электронно-оптической системы в большинстве случаев рассматриваются системы с азимутальной симметрией. Переход к азимутально-несимметричным системам открывает ряд дополнительных возможностей. Так, например, многолучевые гиротроны могут быть построены на основе тонких пучков, находящихся в одной или нескольких плоскостях, что успешно было продемонстрировано в эксперименте [16].

Механизм электронной селекции мод путём секционирования активной среды целесообразно дополнить также использованием различных электродинамических методов селекции мод. Для этого многолучевые системы из пучков разных типов могут быть построены в сочетании с самыми разнообразными электродинамическими системами, что в результате даёт многоствольные гиро-приборы [9]. Идея многолучевых и многоствольных систем в вакуумной высокочастотной электронике является весьма плодотворной и активно используется, например, при создании мощных клистронов [17–19]. Переход к многолучевым клистронам позволяет снизить ускоряющее напряжение по сравнению с однолучевыми аналогами, что приводит к уменьшению габаритов и массы клистронов, а также источников их электропитания. Низкопереванские парциальные пучки лучше группируются и эффективнее отдают энергию в выходном резонаторе, что приводит к повышению коэффициента полезного действия (КПД) клистронов на $10 \div 20\%$ и даёт возможность расширения полосы усиления [18, 19]. Далее рассматривается перспективность данного подхода в многоствольных гиротронах с учётом их особенностей.

1. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ МНОГОСТВОЛЬНОГО ГИРОТРОНА

Многолучевые электронно-оптические системы, используемые в гиротронах, могут иметь самый разный вид. Некоторые из них приведены в работе [20]. Переход к многолучевым и многоствольным системам открывает возможности построения огромного множества новых, ещё не реализованных приборов, имеющих самые разные электродинамические системы. На рис. 1 показаны в качестве примера схемы двух возможных вариантов таких систем. Электронные пучки в данных системах могут быть сформированы при помощи нескольких магнетронно-инжекторных пушек (рис. 1а) или за счёт такой пушки с азимутально-неоднородной эмиссией (рис. 1б). В таких системах при различных параметрах электронных пучков и разной связи между резонаторами могут быть реализованы самые разнообразные динамические режимы. Некоторая техническая сложность таких систем может компенсироваться их уникальными характеристиками.

В частности, простейший многоствольный гиротрон может быть построен в виде системы с несколькими цилиндрическими резонаторами, в каждый из которых влетает приосевой элек-

тронный пучок. При этом каждый резонатор по отдельности работает подобно гиротрону с большой орбитой [21–25]. Качественно схема прибора изображена на рис. 1б. В отличие от канонического гиротрона, здесь в качестве активной среды используется сравнительно тонкий электронный пучок, расположенный около оси резонатора. Тонкий приосевой пучок способен возбудить в аксиально-симметричной электродинамической системе лишь моды с азимутальным индексом, совпадающим с номером циклотронной гармоники. Это правило отбора значительно разрежает спектр мод и тем самым упрощает селективное возбуждение высоких циклотронных гармоник по сравнению с каноническим гиротроном.

Принципиально важной в таких системах является задача формирования приосевого электронного пучка требуемого качества. Для её решения обычно рассматривают неадиабатические электронные пушки с кикером [22] или реверсом магнитного поля [23–25]. В отличие от указанных подходов, в данной системе предлагается использование модифицированной магнетронно-инжекторной пушки с азимутально-неоднородной эмиссией электронного пучка. При этом каждый резонатор отдалён от центральной оси электродинамической системы таким образом, чтобы электронный пучок со своего сектора эмиссии являлся приосевым для соответствующего резонатора. Существенно, что магнитная система в этом случае не отличается от широко распространённых магнитных систем обычных гиротронов с адиабатической магнетронно-инжекторной пушкой. Подробнее вопрос формирования электронного пучка для многоствольного гиротрона будет рассмотрен в отдельной работе.

Далее в качестве примера рассмотрены три перспективных варианта реализации многолучевых многоствольных гиротронов с приосевыми пучками с частотой генерации около 140 ГГц или кратной ей (в случае работы на высоких циклотронных гармониках). Их основные проектные параметры приведены в табл. 1. Рассмотрены возможности перестройки частоты в таких системах, специфика использования парциальных пучков с разными ускоряющими напряжениями («изолированных» электронных пучков), особенности работы на гармониках гирочастоты. Для описания электронно-волнового взаимодействия в резонаторах многоствольного гиротрона использовалась самосогласованная модель [26]. Расчёт мощности выходного излучения системы проведён с учётом омических потерь, неоднородного распределения внешнего магнитного поля и относительного разброса поперечных скоростей в электронном пучке, оценённого в 30 % (оценка сверху). Здесь и далее средняя доля поперечной энергии электронного пучка на входе в пространство взаимодействия оценена как 0,6, что соответствует питч-фактору $g = 1,2$.

2. ВОЗМОЖНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В МНОГОСТВОЛЬНЫХ ГИРОТРОНАХ

Как правило, в гиротронах непрерывная перестройка частоты реализуется за счёт последовательного возбуждения продольных мод $TE_{m,p,q}$, имеющих одинаковую поперечную структуру $TE_{m,p}$ и отличающихся продольным индексом q [27, 28]. Диапазон перестройки частоты можно оценить аналитически:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 (q^2 - 1), \quad (1)$$

где λ — длина волны, L — длина пространства взаимодействия, q — продольный индекс рабочей моды. В случае многоствольного гиротрона доступный диапазон непрерывной перестройки многократно увеличивается за счёт использования нескольких цилиндрических резонаторов с различными радиусами. Для варианта многоствольного частотно-перестраиваемого гиротрона, работающего на частотах вблизи 140 ГГц, весьма перспективной, на наш взгляд, является мода

Таблица 1. Варианты реализации многоствольного гиротрона

Краткое описание	Многоствольная система с непрерывной перестройкой частоты	Многоствольная система с «изолированными» электронными пучками	Многоствольная система для работы на высоких гармониках
рабочая мода	$TE_{1,3} (n = 1)$	$TE_{1,3} (n = 1)$	$TE_{2,5} (n = 2)$ $TE_{3,7} (n = 3)$ $TE_{3,8} (n = 3)$
число резонаторов	5	3	4
рабочий ток, мА	150	150	150
ускоряющее напряжение, кВ	40	15; 40; 80	80
питч-фактор	1,2	1,2	1,2
диапазон частотной перестройки, ГГц	133,2÷146,3	139,0÷145,6	268,1 395,9 447,8
диапазон рабочего магнитного поля, Тл	4,99÷83,0	5,02÷6,29	5,42 5,39 6,1
уровень мощности, Вт	от 35	от 10	980 300 280

Таблица 2. Основные параметры частотно-перестраиваемого многоствольного гиротрона с пятью резонаторами

Номер резонатора	Радиус резонатора, мм	Диапазон перестройки частоты, ГГц	Диапазон рабочих магнитных полей, Тл
1	3,006	133,20÷135,80	4,99÷5,41
2	3,005	135,63÷138,40	5,08÷5,52
3	2,950	138,20÷140,90	5,17÷5,62
4	2,895	140,80÷143,60	5,27÷5,73
5	2,840	143,50÷146,30	5,37÷5,83

$TE_{1,3}$. В этом случае возможна реализация многоствольной системы с пятью резонаторами, при этом расстояние между стенками резонаторов составит 3,5 мм (см. табл. 1 и 2).

Число возбуждаемых продольных мод q зависит от тока пучка, добротности соответствующей моды и её связи с электронным пучком, т. е. объединённого параметра $IQG_{m,p}$, характеризующего эффективность электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона [29]. Здесь I — ток пучка, Q — полная добротность высокочастотных колебаний в резонаторе, $G_{m,p}$ — структурный фактор, который зависит от рабочей моды и радиуса влёта электронного пучка. Малый рабочий ток, свойственный данным системам, компенсируется характерным для приосевого пучка большим значением структурного фактора $G_{m,p}$. Важным параметром в задачах перестройки частоты в гиротроне является длина пространства взаимодействия. Для реализации широкой непрерывной перестройки выбран сравнительно длинный резонатор, с протяжённостью регулируемого участка 25 мм, соответствующий непрерывной перестройке в диапазоне 2,5 ГГц. При

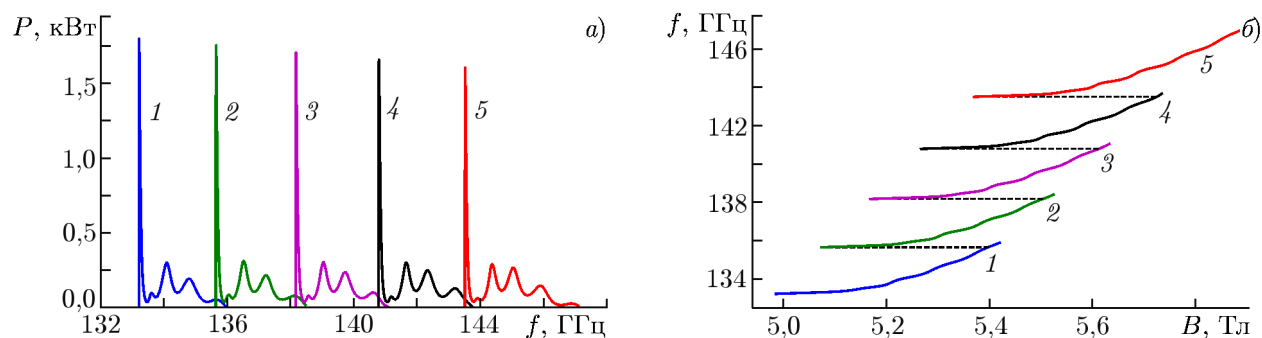


Рис. 2. Зависимость расчётной мощности от частоты генерации (а) и частоты генерации от магнитного поля (б) в многоствольной системе с пятью резонаторами (см. табл. 2)

меньшей длине, хотя диапазон непрерывной перестройки и увеличивается согласно (1), падает полная добротность рабочих мод, что приводит к уменьшению числа возбуждаемых продольных мод. В случае более протяжённого резонатора рост числа рабочих продольных мод ограничен влиянием разброса поперечных скоростей электронного пучка [27]. Кроме того, на диапазон непрерывной перестройки частоты влияет разность потенциалов между катодом и резонатором (ускоряющее напряжение). Для расчётов выбраны ускоряющее напряжение 40 кВ и рабочий ток парциального пучка 150 мА. На рис. 2а изображена расчётная зависимость мощности выходного излучения моды $TE_{1,3}$ от частоты генерации для пяти резонаторов (см. табл. 2) с разными радиусами при заданных параметрах системы. Максимальная мощность выходного излучения согласно результатам расчётов, приведённых на этом рисунке, находится на киловаттном уровне. В рассматриваемой многоствольной системе возможна непрерывная перестройка частоты в диапазоне $133,2 \div 146,3$ ГГц при уровне мощности выходного сигнала 35 Вт. Такой уровень вполне достаточен для многих важных научных и технических приложений, например задач спектроскопии и диагностики.

Как правило, возбуждение последовательности продольных мод с одинаковой поперечной структурой в гиротроне требует изменения внешнего магнитного поля в достаточно широких пределах. Поэтому основной проблемой частотно-перестраиваемых гиротронов обычного типа является конкуренция со стороны паразитных мод, что является основным ограничением диапазона непрерывной перестройки частоты [27]. В случае приосевого пучка это ограничение играет меньшую роль, а в данном случае и вовсе отсутствует. Но вместе с этим появляются и новые специфические проблемы, одной из которых является возбуждение рабочих мод одновременно в нескольких резонаторах системы. Это приводит к многочастотной генерации (см. рис. 2б), которая в некоторых случаях нужна, но может быть и нежелательной. Одним из способов решения проблемы одновременной генерации является переход к использованию магнетронно-инжекторной пушки с нарушенной аксиальной симметрией с отдельным подогревом каждого сектора эмиссии и/или секционированным анодом.

3. ЧАСТОТНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ МНОГОСТВОЛЬНЫЙ ГИРОТРОН С «ИЗОЛИРОВАННЫМИ» ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Решить вышеизложенную проблему возможной одновременной генерации можно и за счёт использования разных ускоряющих напряжений U для каждого электронного пучка. Условие циклотронного резонанса в гиротронах можно представить в виде

$$\omega \approx \omega_{H0}/(1 + U[\text{кВ}]/511), \quad (2)$$

Таблица 3. Расчётные параметры многоствольного гиротрона с «изолированными» электронными пучками

Номер	Радиус резонатора, мм	Длина резонатора, мм	Рабочее напряжение, кВ	Диапазон перестройки частоты, ГГц	Диапазон рабочих магнитных полей, Тл
1	2,935	17	15	139,0÷140,9	5,02÷5,26
2	2,893	20	40	140,9÷143,1	5,26÷5,68
3	2,847	27	80	143,1÷145,6	5,68÷6,29

где ω_{H0} — нерелятивистская гирочастота.

При изменении ускоряющего напряжения условие синхронизма выполняется уже при другом магнитном поле, что позволяет сдвинуть зоны генерации относительно друг друга по магнитному полю и таким образом реализовать перестройку частоты без одновременной многочастотной генерации. Использование разных ускоряющих напряжений для каждого электронного пучка может быть реализовано за счёт изоляции парциальных резонаторов и/или эмиссионных секторов на катоде (парциальные катоды) и, соответственно, подачи разных напряжений на них.

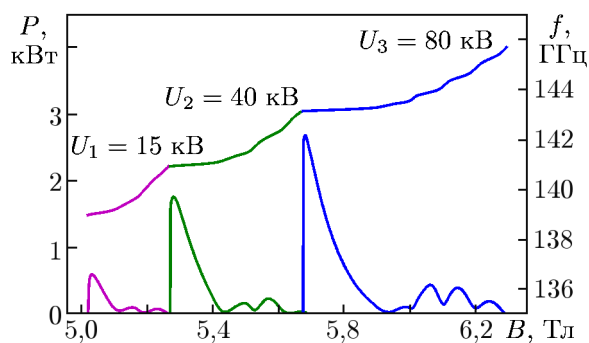


Рис. 3. Расчётная мощность и частота выходного излучения трёхствольного гиротрона в зависимости от магнитного поля

Для примера ниже рассмотрен вариант трёхствольного гиротрона с резонаторами разных длин и радиусов (см. табл. 3). С целью реализации широкополосной непрерывной перестройки частоты выбраны ускоряющие напряжения 15, 40 и 80 кВ. Данный подход позволяет реализовать непрерывную перестройку частоты в диапазоне 139,0÷145,6 ГГц при изменении магнитного поля от 5,02 до 6,26 Тл (см. рис. 3). Такой подход требует использования магнетронно-инжекторной пушки триодного типа с корректирующей катушкой вблизи катода для формирования электронных пучков с требуемыми характеристиками для каждого резонатора. Изменяющийся радиус влёта и азимутальный дрейф электронного пучка при работе с разными ускоряющими напряжениями определяет положение резонаторов относительно центра электродинамической системы. Аналогичным образом при необходимости может быть реализована одновременная генерация на разных частотах.

4. МНОГОСТВОЛЬНЫЕ ГИРОТРОНЫ НА ВЫСОКИХ ГАРМОНИКАХ ГИРОЧАСТОТЫ

Схема многоствольного гиротрона с приосевым пучком позволяет использовать преимущества гиротронов с большой орбитой для возбуждения мод на высоких гармониках гирочастоты. Как правило, для этого в гиротронах используют относительно длинные резонаторы (с длиной более 15λ), при этом работают с высокими ускоряющими напряжениями. На рис. 4 изображена зависимость минимальных стартовых токов мод $TE_{1,3}$ ($n = 1$), $TE_{2,5}$ ($n = 2$) и $TE_{3,8}$ ($n = 3$) от ускоряющего напряжения при длине резонатора 20 мм. Рост ускоряющего напряжения при работе гиротрона на высоких гармониках гирочастоты вследствие мультипольности взаимодействия приводит к снижению стартового тока [30]. При ускоряющем напряжении 80 кВ минимальный

Таблица 4. Расчётные параметры многоствольного гиротрона, работающего на высоких гармониках гирочастоты

Рабочая мода	Номер гармоники	Частота генерации, ГГц	КПД, %	Парциальная мощность, Вт	Магнитное поле, Тл
TE _{2,5}	2	268,1	10,1	980	5,42
TE _{3,7}	3	395,9	2,5	300	5,39
TE _{2,5}	3	447,8	2,3	280	6,10

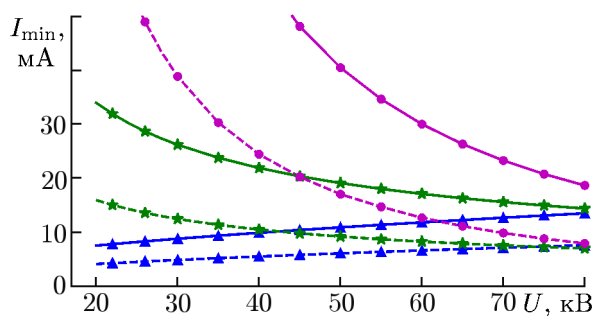
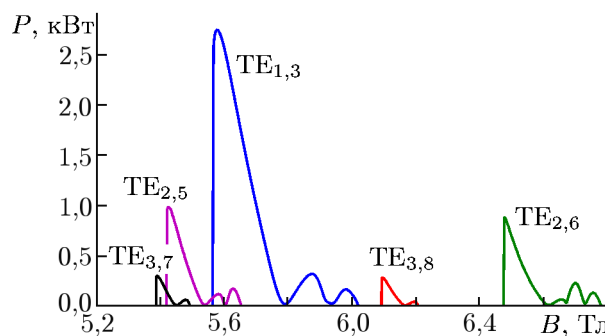
Рис. 4. Минимальный стартовый ток для мод на разных гармониках в зависимости от напряжения при питч-факторе $g = 1,2$ (сплошные кривые) и $g = 1,4$ (пунктирные кривые). Символы $\blacktriangle$, $\star$ и $\bullet$ соответствуют модам TE_{1,3}, TE_{2,5} и TE_{3,8}

Рис. 5. Зависимость мощности выходного излучения от магнитного поля для выбранных рабочих мод и их конкурентов

стартовый ток в случае работы на третьей гармонике снижается более чем в четыре раза по сравнению с ускоряющим напряжением 20 кВ, при этом минимальный стартовый ток моды TE_{2,5} на второй циклотронной гармонике снижается вдвое. Вместе с этим стартовый ток моды на основной циклотронной гармонике растёт с ростом напряжения, что способствует увеличению зоны устойчивости мод на высоких циклотронных гармониках. Повышение доли энергии вращательного движения электронного пучка в области электронно-волнового взаимодействия приводит к дополнительной селекции мод, синхронных с высокими циклотронными гармониками (см. рис. 4).

Рабочие параметры гиротрона указаны в табл. 1 и 4. Следует отметить, что ранее с тем же напряжением и похожим набором рабочих мод был реализован гиротрон с большой орбитой [21]. Согласно расчётам, в многоствольном гиротроне при токе 150 мА возможна генерация на моде TE_{2,5} (268,1 ГГц), синхронной со второй циклотронной гармоникой, и на модах TE_{3,7} (395,9 ГГц) и TE_{3,8} (447,8 ГГц) на третьей циклотронной гармонике. В случае моды TE_{2,5} основную конкуренцию составляет паразитная мода TE_{1,3}, в случае TE_{3,7} — моды TE_{2,5} и TE_{1,3}. Основным конкурентом для моды TE_{3,8} на частоте 447,8 ГГц является мода TE_{1,3} (встречная волна). Расчётные зоны генерации выбранных рабочих мод и их конкурентов представлены на рис. 5. Парциальная мощность выходного излучения при работе на модах TE_{3,7} и TE_{3,8} составила 300 и 280 Вт в каждом резонаторе при КПД 2,5 и 2,3 % соответственно. Это теоретически позволяет реализовать киловаттный уровень мощности в непрерывном режиме в случае 4-ствольного гиротрона с идентичными резонаторами на частотах более 400 ГГц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена новая перспективная схема многоствольного гиротрона. Она достаточно проста в реализации и включает в себя преимущества как канонического гиротрона, если говорить о системе формирования винтового электронного пучка, так и гиротрона с большой орбитой с эффективной селекцией рабочей моды. Такие приборы перспективны для решения задач перестройки частоты генерируемого излучения и для продвижения в терагерцовый диапазон путём возбуждения мод, работающих на высоких гармониках гирочастоты. Эти особенности рассматриваемых приборов востребованы для многих приложений. Как всякий новый электронный прибор, многоствольный гиротрон пока характеризуется рядом проблем, требующих своего решения. Ключевой задачей на данный момент является разработка эффективной широкополосной системы вывода излучения, которая требует новых решений и дополнительных исследований.

Помимо изложенных вариантов, многоствольные гиротроны могут быть использованы вместо набора отдельных гиротронов. Данный подход привлекателен за счёт экономии на магнитных системах. Кроме того, в такой схеме отсутствует проблема взаимного влияния гиротронов на работу друг друга, обусловленного действием магнитного поля соленоида соседнего гиротрона, что позволяет снизить стоимость и уменьшить габариты установки.

Выше мы ограничились рассмотрением многоствольных гиротронов в варианте автономных генераторов. Разумеется, в рамках данной концепции могут быть разработаны и синхронизованные генераторы (включая случай взаимной синхронизации), и усилители. Например, несколько стволы могут быть использованы в качестве гироклистронов (для увеличения коэффициента усиления или полосы), а один ствол с электронным пучком, имеющим пониженный питч-фактор, — как электронный поглотитель с насыщением. В этом случае система может быть применена для генерации ультракоротких импульсов, подобно [31].

Авторы работы благодарны М. Тумму (M. Thumm, Технологический институт Карлсруэ, Германия), М. Ю. Глявину и А. С. Седову за внимание к работе и плодотворные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-30071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольденберг А. Л., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 635–669.
2. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2014. V. 35, No. 4. P. 325–381. <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0050-7>
3. Idehara T., Sabchevski S. P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. V. 46, No. 7. P. 2452–2459. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2775678>
4. Flyagin V. A., Kuftin A. N., Lygin V. K., et al. // Strong microwaves in plasmas. Proc. International Workshop. V. 2. 7–14 August 1996, Nizhny Novgorod, Russia. P. 711–716.
5. Bykov Y., Ereemeev A., Glyavin M., et al // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 1. P. 67–72. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.823904>
6. Денисов Г. Г., Запевалов В. Е., Литвак А. Г., Мясников В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 845–858.
7. Глявин М. Ю., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 6. С. 667–677. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.02.037801>
8. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181, № 8. С. 867–874. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201108f.0867>

9. Запевалов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 4. С. 305–314.
10. Авт. свид. СССР № 786677, МПК: H01J 25/00. Мазер на циклотронном резонансе: № 2801425.18-25 : заявл. 25.07.1979 : опубл. 23.02.1989 / Запевалов В. Е., Курбатов В. И., Малыгин О. В. и др. 4 с.
11. Запевалов В. Е., Цимринг Ш. Е. // Гиротроны. / под ред. В. А. Флягина, Г. С. Нусиновича, В. К. Юлпатов. Горький : ИПФ АН СССР, 1980. С. 60–73.
12. Запевалов В. Е., Мануилов В. Н., Малыгин О. В., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 3. С. 387–392.
13. Liu S., Liu D., Yan Y., et al. // 40th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz waves (IRMMW-THz). 23–28 August 2015, Hong Kong, China. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2015.7327569>
14. Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88, No. 9. Art. no. 094708. <https://doi.org/10.1063/1.4997994>
15. Bandurkin I. V., Glyavin M. Y., Idehara T., Savilov A. V. // IEEE Trans. Electron Devices. 2019. V. 66, No. 5. P. 2396–2400. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2905047>
16. Jerby E., Kesar A., Korol M., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27, No. 2. P. 445–455. <https://doi.org/10.1109/27.772272>
17. Palmer R. B., Fernow R. C., Fischer J., et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 366, No. 1. P. 1–16. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00609-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00609-5)
18. Борисов Л. М., Гельвич Э. А., Жарый Е. В. и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1993. № 1(455). С. 12–20.
19. Freydovich I. A., Knapp E. A., Nevsky P. V., et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2005. V. 539, No. 1–2. P. 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.10.004>
20. Запевалов В. Е., Мануилов В. Н., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34, № 2. С. 205–210.
21. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 7. С. 525–535.
22. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н., Самсонов С. В. // Журн. техн. физ. 2005. Т. 75, № 12. С. 76–81.
23. Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 3. P. 903–909. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.827614>
24. Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S., et al. // Vacuum. 2005. V. 77. P. 539–456. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.09.022>
25. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 4. С. 537–544.
26. Moiseev M. A., Nemirovskaya L. L., Zapevalov V. E., Zavolsky N. A. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. V. 18, No. 11. P. 2117–2128. <https://doi.org/10.1007/BF02678254>
27. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Зуев А. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 6. С. 494–504.
28. Fedotov A. E., Rozental R. M., Zotova I. V., et al. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2018. V. 39, No. 10. P. 975–983. <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0522-2>
29. Братман В. Л., Моисеев М. А., Петелин М. И., Эрм Р. Э. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 4. С. 622–630.
30. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Малыгин О. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 5–6. С. 418–424.
31. Вилков М. Н., Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С. // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 1. С. 61–66. <https://doi.org/10.7868/S0367676518010131>

Поступила в редакцию 21 января 2020 г.; принята в печать 27 февраля 2020 г.

MULTIBARREL GYROTRONS

V. E. Zapevalov, A. S. Zuev, and A. N. Kuftin

We propose a fundamentally new scheme of the multibarrel gyrotron. As an example, we consider three promising variants of implementation of the scheme with a generation frequency of about 140 GHz or its multiple in the case of operation at higher cyclotron harmonics. A variant of a multibarrel gyrotron with wide-range continuous frequency tuning about 13.1 GHz is discussed. The possibility of operating a gyrotron of this type at the third cyclotron harmonic with a total power of the output radiation exceeding 1 kW at a frequency of 448 GHz is considered.