

УДК 621.385.69

## ИССЛЕДОВАНИЯ ГИРОТРОННОЙ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ СО СПИРАЛЬНО ГОФРИРОВАННЫМИ ВОЛНОВОДАМИ В ИПФ РАН: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*С. В. Самсонов\**, *А. А. Богдашов*, *И. Г. Гачев*, *Г. Г. Денисов*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Гиротронная лампа бегущей волны (гиро-ЛБВ) является широкополосной разновидностью гиротронных усилителей, позволяющих получать импульсное или непрерывное излучение в миллиметровом диапазоне длин волн с мощностью, на  $1\div 2$  порядка превосходящей мощность обычных ЛБВ с замедляющими структурами и прямолинейными пучками. С 1996 года в ИПФ РАН развивается концепция gyro-LBВ, основанная на использовании волновода с винтовой гофрировкой поверхности, которая радикально изменяет дисперсию одной из собственных волн гладкого волновода круглого сечения. В данной статье обсуждается ряд проблем реализации этих приборов, определившихся в результате многолетних экспериментальных исследований, приводятся параметры gyro-LBВ, разработанных с учётом требований конечных пользователей для конкретных приложений, а также обсуждаются направления дальнейшего совершенствования этого усилителя.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие исследований в области создания мощных широкополосных усилителей миллиметрового диапазона длин волн определяется, в первую очередь, потребностями таких приложений, как радиолокация и средства связи (включая не только передачу информации, но и противодействие её приёму) [1–3]. Кроме того, такие микроволновые источники привлекательны в качестве инструментов для ряда научных исследований, включая различные плазменные установки, ускорители заряженных частиц, а также спектроскопические комплексы [1, 2]. В настоящее время наибольший уровень импульсной (длительностью десятки-сотни микросекунд), средней и непрерывной мощности в сочетании с относительно широкой (до 10 %) частотной полосой на длинах волн от 10 до 1 мм обеспечивают гиротронные лампы бегущей волны (гиро-ЛБВ) [4]. Несмотря на то, что массо-габаритные показатели gyro-LBВ пока не позволяют им составлять конкуренцию обычным ЛБВ или твердотельным каскадам на борту самолётов и спутников, использование gyro-LBВ в стационарных или мобильных устройствах (автомобильных платформах, морских судах) зачастую может оказаться более эффективным, чем суммирование излучения множества (как правило, десятков или сотен) альтернативных менее мощных источников.

Несмотря на то, что теория gyro-LBВ [5, 6] была развита одновременно или даже раньше, чем теория гиротрона, первые эксперименты, в которых эти приборы начали демонстрировать характеристики, необходимые для приложений, были выполнены сравнительно недавно —  $15\div 20$  лет назад [7–15]. Основной проблемой реализации gyro-LBВ являлась их неустойчивость к паразитному самовозбуждению. Действительно, неизвестно ни одного эксперимента, в котором была бы реализована первоначально предложенная схема gyro-LBВ в виде гладкого длинного (порядка десяти и более длин волн) волновода. Кроме того, gyro-LBВ обычно обладают сильной чувствительностью к разбросу скоростей электронов, приводящей к значительному снижению её эффективности по сравнению с гиротронами и гироклистронами. В настоящее время можно

---

\* samsonov@ipfran.ru

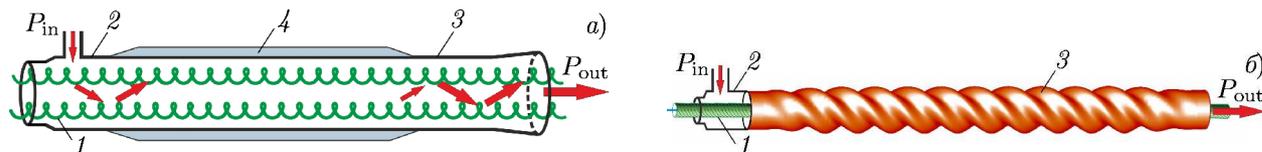


Рис. 1. Принципиальные схемы gyro-ЛБВ с сильными распределёнными потерями (а) и gyro-ЛБВ со спирально гофрированным волноводом (б): 1 — электронный пучок; 2 — узел ввода сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала; 3 — основная область электронно-волнового взаимодействия; 4 — поглотитель, обеспечивающий большой коэффициент затухания излучения

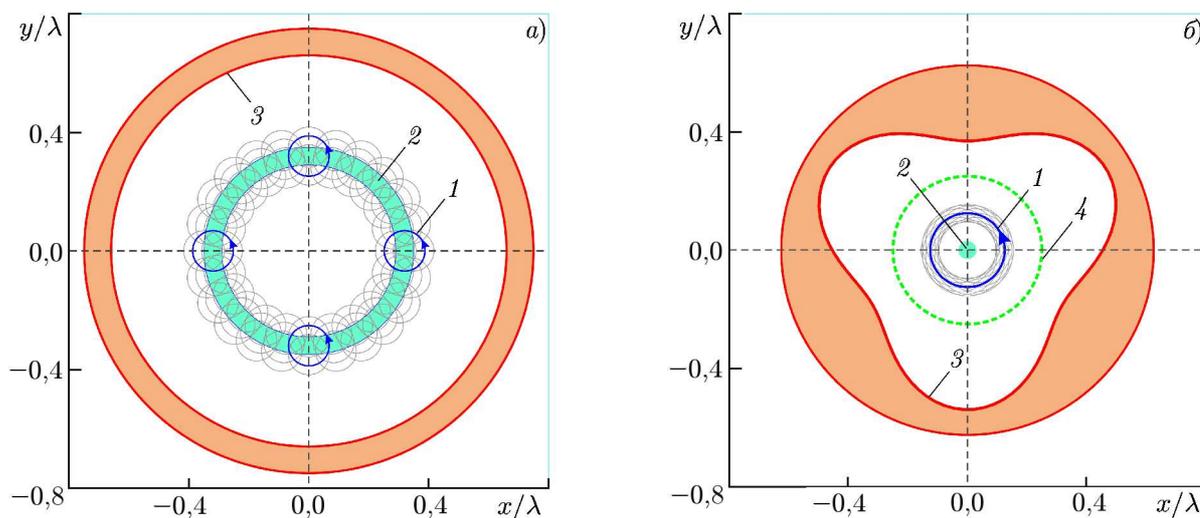


Рис. 2. Поперечные сечения электродинамических систем и электронных пучков для «гладкой» gyro-ЛБВ на моде  $TE_{0,1}$  (а) и винтовой gyro-ЛБВ (б): 1 — циклотронные орбиты электронов (синие и серые окружности) при энергии частиц 80 кэВ и питч-факторе 1,2; 2 — область, занимаемая ведущими центрами циклотронных орбит; 3 — внутренняя стенка электродинамической системы; 4 — внешняя граница пучка в винтовой gyro-ЛБВ при увеличении радиуса области 2 до размеров радиуса циклотронной орбиты

выделить два основных пути преодоления указанных проблем: использование гладкого волновода с большими распределёнными потерями и применение волновода с винтовой гофрировкой внутренней поверхности (спирально-гофрированного волновода; см. рис. 1 и 2).

Первый из указанных подходов, начало использования которого было положено успешными экспериментами, обсуждаемыми в публикациях [7–9], основан на работе gyro-ЛБВ в условиях основного циклотронного резонанса при использовании сравнительно низкой моды круглого волновода ( $TE_{1,1}$  или  $TE_{0,1}$ ). При этом на большей части длины пространства взаимодействия, кроме относительно коротких входного и выходного участков, присутствует диэлектрик-поглотитель, обеспечивающий сильное затухание волны (см. рис. 1а). Использование такого поглотителя позволяет подавить все паразитные моды. Кроме того, рабочее взаимодействие обеспечивается на частотах вблизи частоты отсечки волновода, что минимизирует эффекты, вызванные разбросом скоростей электронов, позволяя, тем не менее, обеспечить существенно более широкую, чем, например, у гироклистрона, полосу усиления. Реализация этого подхода в ряде экспериментов позволила получить высокие пиковые мощности (50÷290 кВт), высокие коэффициенты усиления (50÷70 дБ) и широкие полосы усиления (5÷12%) для gyro-ЛБВ  $K_a$ -диапазона, работающих в импульсных (1÷100 мкс) режимах с относительно высокой скважностью (частота повторения импульсов до 50 Гц) и, соответственно, низкой средней мощностью [7–13]. Недавно были опубли-

кованы результаты экспериментального исследования, в которых гиро-ЛБВ  $K_a$ -диапазона обеспечивала выходные пиковую и среднюю мощности 150 и 10 кВт соответственно при полосе усиления 9 % [14]. На сегодняшний день единственная (согласно опубликованным источникам) гиро-ЛБВ, используемая для приложений [15], также основана на использовании структуры с поглощением. Данная лампа работает в  $W$ -диапазоне и имеет весьма умеренный коэффициент полезного действия (КПД), 4%, но впечатляющую для этого диапазона среднюю (0,8 кВт) и импульсную (2 кВт) мощность в сочетании с широкой (около 7%) полосой и высоким коэффициентом усиления (44÷47 дБ) [16].

В 1996 году в ИПФ РАН была предложена альтернативная гладкому волноводу с большими потерями электродинамическая система гиро-ЛБВ, а именно волновод с винтовой гофрировкой поверхности (см. рис. 1б) [17, 18]. Ряд первых работ в данном направлении [19–21] был выполнен в сотрудничестве с исследовательской группой из Стратклайдского университета (University of Strathclyde, г. Глазго, Великобритания). Уже в первых экспериментах, проведенных как в ИПФ РАН, так и в Стратклайдском университете, удалось продемонстрировать уникальные возможности «винтовых» гиро-ЛБВ по достижению высокого электронного КПД и широкой полосы усиления [20–22]. Очевидно, что по сравнению с первым, отмеченным выше способом реализации гиро-ЛБВ отсутствие диэлектрического поглотителя в пространстве взаимодействия этого прибора является положительным фактором для достижения более высоких уровней непрерывной и средней мощности.

Ряд других важных особенностей гиро-ЛБВ со спирально гофрированными волноводами обсуждается далее, в разделе 1. В разделах 2 и 3 на основе накопленного опыта численных и экспериментальных исследований винтовых гиро-ЛБВ обсуждаются некоторые особенности, которые в ряде случаев ограничивают коэффициент и полосу усиления. В разделе 4 приводятся результаты экспериментальных исследований гиро-ЛБВ, разработанных для конкретных приложений, а в разделе 5 обсуждаются перспективы дальнейшего совершенствования гиро-ЛБВ.

## 1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИРО-ЛБВ СО СПИРАЛЬНО ГОФРИРОВАННЫМИ ВОЛНОВОДАМИ

В гиро-ЛБВ со спирально гофрированным волноводом, как и в гиротроне, используется резонансное циклотронное взаимодействие электронного пучка с одной из  $TE$ -мод волновода круглого сечения на частоте, близкой к критической. При этом периодическая гофрировка поверхности волновода должна обеспечивать эффективное рассеяние данной моды в другую моду волновода с более низкой критической частотой. Очевидно, что с точки зрения достижения высокого уровня мощности выходного излучения предпочтительным, как и в гиротронах, является использование максимально сверхразмерных микроволновых структур и трубчатых пучков большого диаметра, однако проблема обеспечения полного «молчания» усилителя в отсутствие входного сигнала существенно ограничивает выбор рабочих мод и конфигураций электронного пучка. К настоящему времени в результате теоретического анализа найдено лишь несколько конфигураций, обеспечивающих устойчивую работу гиро-ЛБВ со спирально-гофрированными волноводами [23, 24], а все эксперименты с такими гироусилителями выполнены для самой низкомодовой комбинации, а именно, когда квазикритическая циркулярно поляризованная мода  $TE_{2,1}$  рассеивается в бегущую волну  $TE_{1,1}$  на 3-заходной винтовой гофрировке. При этом только использование так называемого приосевого электронного пучка (пучка, у которого центры циклотронных орбит расположены в непосредственной близости к оси системы; см. рис. 2б) и настройка магнитного поля на резонанс на второй циклотронной гармонике позволяют обеспечить необходимую селекцию: такой пучок не возбуждает моду  $TE_{2,1}$  противоположного вращения и не может возбудить моду

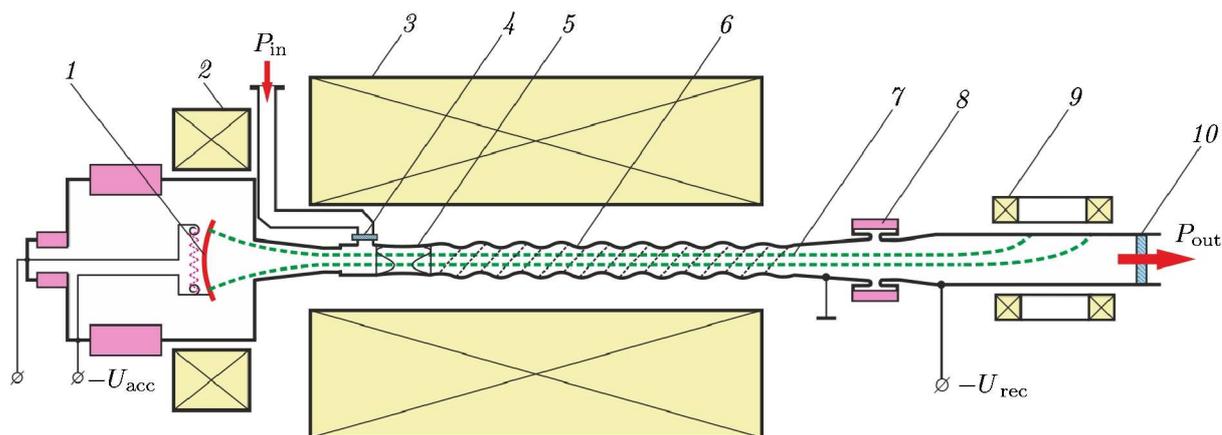


Рис. 3. Схема гиро-ЛБВ со спирально гофрированным волноводом: 1 — катод; 2 — катодная катушка; 3 — основной соленоид; 4 — узел СВЧ ввода с барьерным окном; 5 — поляризатор; 6 — винтовая структура; 7 — электронный пучок; 8 — высоковольтный разрыв с изолятором для реализации частичной рекуперации энергии; 9 — коллекторная катушка; 10 — выходное окно ( $U_{acc}$  — ускоряющее напряжение;  $U_{rec}$  — напряжение рекуперации,  $U_{acc} > U_{rec}$ )

$TE_{1,1}$  ни на основной, ни на второй циклотронной гармонике. Принципы выбора параметров винтовых структур, а также методы расчёта и измерения их электродинамических характеристик подробно обсуждаются в работах [23, 25–27]. Методы формирования необходимых для винтовых гиро-ЛБВ электронных пучков, из которых наиболее исследованным в теории и экспериментах является метод, основанный на использовании пушки с каспом или реверсом магнитного поля вблизи катода, обсуждаются в работах [23, 28, 29].

К настоящему времени накоплен достаточно обширный экспериментальный материал и опыт создания гиро-ЛБВ (в основном  $K_a$ -диапазона) для конкретных приложений [30–33]. Исходя из этого опыта, в данной статье мы хотим, в частности, обсудить некоторые особенности как винтовых структур, так и электронно-оптических систем, которые в ряде случаев ограничивают достижение высоких выходных характеристик гиро-ЛБВ, таких как коэффициент усиления, частотная полоса и мощность выходного излучения.

## 2. ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

При обсуждении коэффициента усиления необходимо в первую очередь отметить, что наиболее предпочтительными (с точки зрения массо-габаритных показателей, надёжности, простоты обслуживания, стоимости, доступности и тому подобного) источниками входных сигналов являются твердотельные (полупроводниковые) генераторы и усилители, мощности наиболее доступных из которых в настоящее время ограничены десятками ватт в длинноволновой части и десятками-сотнями милливатт в коротковолновой части миллиметрового диапазона. В связи с этим, очевидно, что для пользователя крайне желательно, чтобы гиро-ЛБВ с мощностью выходного излучения в десятки-сотни киловатт имели бы коэффициент усиления  $G$  по крайней мере 30–40 дБ. Однако, как показывает практика, для «стандартной» (наиболее освоенной к настоящему времени) конфигурации винтовой гиро-ЛБВ (см. рис. 3) достижению указанных значений коэффициента усиления препятствуют следующие обстоятельства.

Во-первых, следует принять во внимание тот факт, что несмотря на все меры по обеспечению широкополосного согласования элементов выходной микроволновой системы (выходного преобразователя, высоковольтного разрыва, выходного окна и последующего тракта; см. рис. 3)

коэффициент отражения волны (включая отражение от нагрузки пользователя) назад в винтовую структуру составляет не менее 1% ( $-20$  дБ) по мощности. При этом можно считать, что больше 90% этой мощности возвращается в виде волны  $TE_{1,1}$  того же направления вращения, но с другим направлением винта (если излучается левополяризованная волна, то отражённая является правополяризованной, и наоборот). В таком виде отражённая волна практически без возмущений со стороны гофрировки и электронного пучка распространяется в винтовой структуре, а, проходя через поляризатор, преобразуется в волну линейной поляризации, ортогональной поляризации волны  $TE_{1,1}$ , поступающей на вход поляризатора после узла ввода (см. рис. 3). Узел сверхвысокочастотного (СВЧ) ввода в данном случае эффективно передаёт от входного источника излучение только одной поляризации (поступающей в низшей волне прямоугольного волновода). При этом волна с ортогональной поляризацией, падающая со стороны круглого волновода, практически полностью отражается таким элементом. В результате отражённая от выхода гиро-ЛБВ волна отражается также и от узла ввода, ещё раз проходит сквозь поляризатор и опять становится циркулярно поляризованной, но с другим направлением винта по отношению к рабочей волне гиро-ЛБВ. Поэтому, пройдя ещё раз сквозь всё пространство взаимодействия, данный сигнал будет испытывать только незначительные омические потери. Таким образом, селективность электронно-волнового взаимодействия по отношению к волнам круговой поляризации и использование поляризатора на входе винтовой структуры позволяет в существенной степени ослабить попадание отражённого сигнала на вход усилителя в виде рабочей волны и повысить его устойчивость к самовозбуждению из-за «отражательной» обратной связи. В идеальном случае такая поляризационная развязка (без использования невзаимных элементов) приводит к тому, что цепь обратной связи замыкается только после 2-кратного отражения сигнала от элементов выходной системы и, соответственно, пороговый для самовозбуждения линейный коэффициент усиления системы составил бы не 20, а 40 дБ. Однако, как показывает практика, вследствие не 100-процентной эффективности поляризатора (в частности, на краях рабочей полосы), наличия определённой несоосности элементов и конечной точности их изготовления эффективность такой развязки можно оценить добавлением около 10 дБ к пороговому коэффициенту линейного усиления, который, таким образом, для рассмотренной конфигурации («прозрачной» в терминологии обычных ЛБВ) гиро-ЛБВ не должен превышать 30 дБ на центральной частоте. Отметим, что, как и для большинства других разновидностей электровакуумных усилителей, наибольший КПД и широкая полоса усиления в винтовой гиро-ЛБВ реализуются в существенно нелинейных режимах (режимах насыщения по мощности входного излучения), когда коэффициент усиления падает на  $5 \div 10$  дБ по сравнению с линейным режимом. Таким образом, рабочий коэффициент усиления винтовых гиро-ЛБВ в конфигурации, показанной на рис. 3, оказывается ограниченным величиной  $G = 20 \div 25$  дБ. Это подтверждается многочисленными экспериментами: при попытках увеличения коэффициента усиления той или иной уже изготовленной лампы (основными доступными внешними параметрами, позволяющими оперативно регулировать  $G$ , являютсяpitch-фактор частиц, управляемый, как правило, током катодной катушки, и ток электронного пучка, управляемый накалом катода) возникает самовозбуждение на частоте, лежащей в окрестности с шириной  $1 \div 2\%$  около центральной частоты усилителя.

Другим, достаточно специфическим именно для винтовых гиро-ЛБВ обстоятельством, требующим особого внимания, является повышенная критичность винтовых структур таких усилителей к одному из возможных при изготовлении и компьютерном моделировании отклонению реальной (или аппроксимированной конечными элементами) поверхности от заданной (см. рис. 1б и 2б). Как показали исследования, одним из наиболее негативных факторов является присутствие деформации поперечного сечения структуры с азимутальным индексом 4. При этом заметный эффект, а именно возникновение паразитного отражения в рабочем диапазоне частот, начинает про-

являться при амплитудах такой деформации, составляющей около или менее  $0,01\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве. При изготовлении или сборке такая деформация может возникнуть, например, при одностороннем сжатии (сплющивании), незначительном искривлении, при технологии отдельного изготовления двух половин структуры (эта технология привлекательна возможностью создания «изнутри» очень длинных структур коротковолновой части миллиметрового диапазона) и т. д. При компьютерном моделировании азимутальный индекс 4 возникает при аппроксимации расчётного пространства набором прямоугольных параллелепипедов. Как показывает анализ, наличие дополнительного продольно-однородного возмущения с азимутальным индексом 4 и достаточно длинной ( $20\lambda \div 30\lambda$ ) поверхности винтовой структуры приводит к сильному резонансному рассеиванию рабочей собственной волны винтового волновода в такую же волну, но противоположного направления вращения и, соответственно, продольного распространения. В результате циркулярно-поляризованная волна  $TE_{1,1}$ , запускаемая на вход хорошо согласованной (имеющей достаточно протяжённые участки плавного нарастания и спада гофрировки) винтовой структуры, испытывает отражение в волну такого же направления винта в окрестности частоты, при которой волновое число рабочей волны равно нулю. Аналогично брэгговскому, коэффициент такого отражения пропорционален произведению длины возмущения на его амплитуду, а полоса резонанса обратно пропорциональна амплитуде. В качестве характерных примеров проявления таких негативных эффектов приведём следующие.

1) Расчёт прохождения рабочей волны через винтовую структуру гиро-ЛБВ с сечением, показанным на рис. 2б, с помощью программы CST MicroWave Studio [34], реализующей FDTD-алгоритм решения уравнений Максвелла в пространственно-временной области. В данном случае анализируемый объём разбивается на прямоугольные параллелепипеды, продольные размеры которых в пределах  $dz = (0,01 \div 0,10)\lambda$  мало влияли на результаты расчётов, а поперечные ( $dx$ ,  $dy$ ) оказывали существенное влияние. Так, при  $dx = dy = 0,01\lambda$  для структуры с длиной  $30\lambda$  коэффициент паразитного отражения на центральной частоте достигает 3 % по мощности, а при укрупнении сетки до  $dx = 0,015\lambda$  отражение возрастает до 8 % (заметим, что при расчётах тех же структур, выполненных программами в частотной области, где объём разбивается на тетраэдры, подобного отражения не наблюдается).

2) Моделирование «неидеальной сборки» структуры с длиной  $30\lambda$  и сечением, близким к показанному на рис. 2б, составленной из двух половин (см. рис. 4). Трёхмерный расчёт такой структуры с сеткой  $dx = dy = 0,005\lambda$  показывает, что в случае идеальной поверхности (с точностью до сеточной аппроксимации) отражение волны  $TE_{1,1}$  не превышает  $-25$  дБ. Однако при возникновении зазора между половинами (заполненного металлом) с толщиной всего  $0,01\lambda$  отражение увеличивается до 40 % (по мощности), а при поперечном сдвиге половин относительно друг друга на  $0,01\lambda$  оно достигает 75 %. Отметим, что измеренный коэффициент отражения для структуры, изготовленной по такой технологии (см. рис. 4), достигал около 30 % на центральной частоте, что подтверждается приведёнными выше результатами компьютерного моделирования. На основе данных исследований сделан вывод об ограничениях и необходимых уровнях точности при использовании технологии изготовления винтовых структур «из двух половин».

Отметим, что и при использовании более традиционных технологий изготовления винтовых структур (в частности, с обработкой вращающейся детали-оправки), когда систематическое возникновение деформации с азимутальным индексом 4 является маловероятным, тем не менее для ряда изготовленных образцов структур длинноволновой части миллиметрового диапазона в «холодных» измерениях наблюдались резонансные отражения с величиной до  $-(15 \div 17)$  дБ, тогда как в большинстве случаев отражение для рабочей волны не превышало  $-(20 \div 22)$  дБ. Наряду с фазовыми измерениями коэффициента прохождения, дающими информацию для определения дисперсии рабочей волны, такие измерения отражения использовались для контроля качества

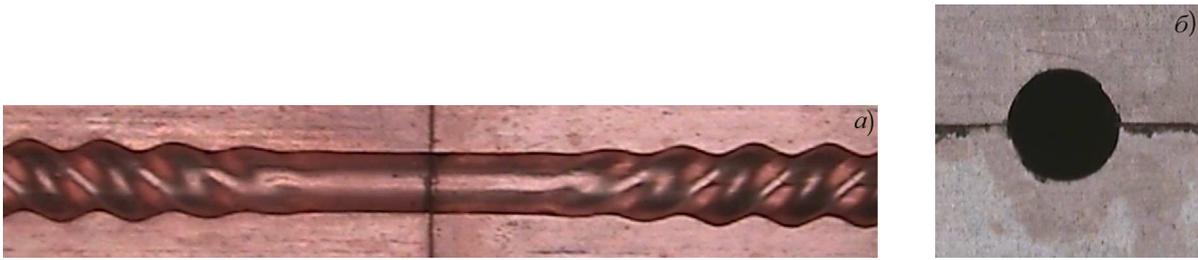


Рис. 4. Фотографии, иллюстрирующие технологию изготовления винтовой структуры на частоту 260 ГГц из двух продольных «половин»: (а) — фрагмент фотографии, показывающий участки перехода гофрированной поверхности к цилиндрической; (б) — фотография торца детали после соединения «половин» и пайки (диаметр отверстия 0,9 мм)

изготовленных образцов.

Таким образом, «прозрачность» микроволновых структур винтовых giro-ЛБВ и их повышенная критичность к определённым неточностям изготовления налагают существенные ограничения на достижимые коэффициенты усиления. Одними из хорошо известных способов решения данной проблемы являются секционирование пространства взаимодействия, а также «разделение» усилителя на несколько независимых каскадов, что применительно к винтовым giro-ЛБВ подробно проанализировано в работе [35].

### 3. ПРОБЛЕМЫ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ УСИЛЕНИЯ

Как обсуждалось в ранних работах по giro-ЛБВ со спирально гофрированными волноводами [17–19], благодаря специфике «синтезированной» дисперсии рабочей волны в этих усилителях возможно обеспечение синхронизма с электронным пучком в достаточно широкой полосе частот (см. рис. 5б, где  $\omega$  — частота,  $\omega_0$  — центральная частота диапазона,  $k_{||}$  — продольное волновое число). Очевидно, что по сравнению с giro-ЛБВ на основе гладкого волновода (см. рис. 5а), «вовлечение» во взаимодействие областей нулевого и отрицательных волновых чисел должно расширить полосу усиления по меньшей мере в  $2,0 \div 2,5$  раза. Однако, как показывают многочисленные экспериментальные исследования как винтовых [21–23, 31–33, 36, 37], так и гладких [7–14, 16] giro-ЛБВ, лишь в одном эксперименте была продемонстрирована действительно очень широкая для таких приборов полоса усиления винтовой giro-ЛБВ, 20 % [21]. В остальных экспериментах при примерно одинаковых параметрах электронного пучка (напряжение  $40 \div 80$  кВ, ток  $2 \div 10$  А, питч-фактор  $1,0 \div 1,2$ ) полосы усиления гладкой и обычной giro-ЛБВ в большинстве случаев оказываются сравнимы и лежат в диапазоне  $7 \div 10$  %.

Как известно (см., например, [19]), одним из основных факторов, влияющих на полосу усиления giro-ЛБВ, является разброс продольных скоростей частиц: увеличение этого разброса приводит к сужению полосы со стороны больших (по модулю) значений волновых чисел. Таким образом, наиболее вероятной причиной близких по ширине полос усиления гладких и винтовых giro-ЛБВ является существенно меньший разброс, достигаемый в экспериментах с гладкими giro-ЛБВ. Теоретический анализ [19] показывает, что, например, для giro-ЛБВ с энергией пучка 80 кэВ и питч-фактором частиц 1,2 ширина полосы усиления гладкой giro-ЛБВ  $7 \div 10$  % реализуется при разбросе скоростей не более 20 %. В то же время, чтобы обуздать полосу винтовой giro-ЛБВ до таких же значений, требуется электронный пучок с вдвое большим ( $40 \div 45$  %) разбросом скоростей.

Рассмотрим здесь основные факторы, препятствующие получению в винтовых giro-ЛБВ электронных пучков с разбросом скоростей по крайней мере сравнимым с разбросом скоростей

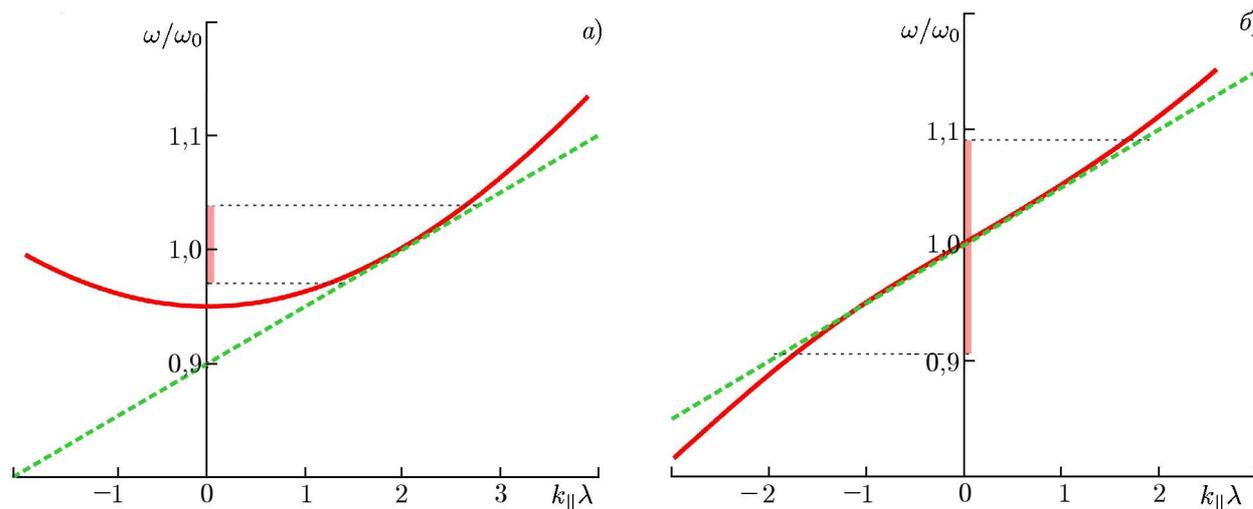


Рис. 5. Дисперсионные диаграммы «холодных» электромагнитных (красные сплошные кривые) и электронно-циклотронных (зелёные штриховые прямые) волн в «гладкой» (а) и «винтовой» (б) giro-ЛБВ (розовым цветом показана полоса усиливаемых частот, наклон дисперсии электронной волны соответствует энергии частиц 80 кэВ и питч-фактору 1,2)

в пучках гладких giro-ЛБВ. Существенные отличия топологии приосевых электронных пучков для винтовых giro-ЛБВ и трубчатых поливинтовых пучков, используемых в гладких giro-ЛБВ (см. рис. 2), требуют существенно различных электронно-оптических систем для их формирования.

Несмотря на то, что средний радиус пучка гладкой giro-ЛБВ на моде  $TE_{0,1}$  достаточно мал ( $0,3\lambda \div 0,4\lambda$ ) по сравнению с типичными гиротронными пучками, этот радиус почти в 5 раз превышает радиус циклотронных орбит электронов (см. рис. 2а). В результате, как и для большинства гиротронов, для формирования такого пучка используется магнетронно-инжекторная пушка с достаточно типичной конфигурацией и сравнительно небольшим коэффициентом компрессии по магнитному полю — около 10. Таким образом, магнитное поле на катоде типичных гладких giro-ЛБВ  $K_a$ -диапазона составляет очень большую по сравнению с возможными внешними полями и полями пространственного заряда пучка величину порядка 1 000 Гс.

Для винтовых giro-ЛБВ качественное отличие геометрии электронного пучка (см. рис. 2б) и вдвое меньшая величина продольного магнитного поля в области взаимодействия (из-за работы на второй циклотронной гармонике) приводят к существенному (более чем на порядок) изменению соотношения сил пространственного заряда пучка и сил магнитного удержания электронов. Для формирования таких приосевых пучков в большинстве случаев используются пушки с так называемым каспом или реверсом магнитного поля вблизи катода [23, 28, 29], применяемые также и для гиротронов с большими орбитами [38–40]. При этом магнитное поле на катоде, регулируемое током встречной по отношению к основному соленоиду катушки (см. рис. 3), составляет величину порядка 10 Гс и обращается в нуль на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности эмиттера. Несмотря на малую величину магнитного поля в области катода и повышенное влияние пространственного заряда, в расчётах идеальных осесимметричных систем, как правило, удаётся найти конфигурации электродов пушек, формирующих пучки с необходимыми параметрами и разбросом поперечных скоростей не более 10%. Однако, как показывают дополнительные расчёты, в том числе 3-мерные, такие системы оказываются очень критичными к различным нарушениям геометрии и внешним магнитным полям. При этом осесимметричные возмущения, такие как отклонения радиальных и продольных координат точек поверхности

электродов на величины до нескольких процентов, а также, например, магнитное поле спирали накала катода, могут существенно (на  $20 \div 30\%$ ) изменить питч-фактор электронов, слабо влияя при этом на разброс их скоростей. Рабочее значение питч-фактора в этих случаях «восстанавливается» небольшой корректировкой тока катодной катушки. Более серьёзные ухудшения качества электронного пучка возникают при различных нарушениях осевой симметрии системы. Так, расчёты показывают, что, например, для giro-ЛБВ  $K_a$ -диапазона параллельное смещение катода от оси системы на 0,5 мм вызывает увеличение разброса с  $10\%$  до  $30\%$ . В данном случае такое ухудшение качества пучка можно частично компенсировать (уменьшить разброс с  $30\%$  до  $15\%$ ), сместив лампу целиком так, чтобы центр катода опять вернулся на ось магнитного поля. Однако, существует ряд вполне вероятных отклонений от заданной геометрии пушки или внешние возмущения магнитного поля, которые практически невозможно компенсировать. Так к увеличению разброса с  $10\%$  до  $30\%$  приводит, например, наклон катода относительно оси на угол около  $0,5^\circ$  или размещение элемента с характерными размерами  $50 \times 50 \times 500$  мм из ферромагнитного материала на радиальном расстоянии около 0,5 м от катода. Таким образом, несмотря на то, что в расчётах осесимметричных электронно-оптических систем удаётся получать качество приосевых электронных пучков, сравнимое с качеством магнетронно-инжекторных пучков для гладких giro-ЛБВ, критичность пушек с каспом к различным возмущениям оказывается более сильной. Это приводит к тому, что на практике в большинстве случаев разброс скоростей в пучках винтовых giro-ЛБВ составляет  $30 \div 40\%$ , что, в свою очередь, заметно сужает полосу усиления и делает её сравнимой с полосой гладкой giro-ЛБВ. Тем не менее, в пользу рассматриваемых здесь винтовых giro-ЛБВ заметим в очередной раз, что они работают на второй гармонике циклотронной частоты, т. е. с магнитным полем в 2 раза меньшим, чем гладкие giro-ЛБВ, что даёт качественный выигрыш в используемых магнитных системах («тёплые» соленоиды или постоянные магниты вместо сверхпроводящих систем). Вопрос о достижимой ширине полосы, мощности и коэффициенте усиления гладких giro-ЛБВ при работе на второй циклотронной гармонике остаётся пока открытым, т. к. убедительных экспериментальных результатов по исследованию таких усилителей, интересных с прикладной точки зрения, в научных публикациях практически не приводится.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИРО-ЛБВ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ

К настоящему времени исследовательской группой ИПФ РАН разработано и испытано несколько вариантов giro-ЛБВ со спирально гофрированными волноводами. После нескольких успешных экспериментов, подтверждающих основные выводы теории, последующие усилители данного типа разрабатывались с учётом требований конечных пользователей для конкретных приложений. При этом, как правило, изготавливалось и испытывалось несколько практически одинаковых (с точностью до погрешностей изготовления) образцов. Результаты испытаний лучших из них приведены в табл. 1 [41], а подробности экспериментов изложены в публикациях [30–33]. Отметим, что в этих экспериментах демонстрируются близкие к предельным выходные характеристики giro-ЛБВ (мощность и полоса) при заданных ограничениях со стороны источников питания. Такие характеристики, как правило, достигаются в так называемых «лабораторных» режимах, характеризующихся минимальным воздействием внешних факторов, максимальной доступностью и точностью внешней юстировки, максимальной мощностью входного сигнала (особенно на краях частотной полосы усиления), максимальной величиной питч-фактора и соответствующей «близостью» к самовозбуждению, а также сравнительно высокой скважностью при работе в импульсных режимах. Мощность выходного излучения и полоса усилителей, отве-

Таблица 1. Параметры экспериментальных образцов giro-ЛБВ  $K_a$ -диапазона

Параметр	Импульсная giro-ЛБВ	Непрерывная giro-ЛБВ
Ускоряющее напряжение, кВ	70	40
Тормозящее напряжение *, кВ	25	20
Ток пучка, А	10	1,5
Магнитное поле, Тл	0,68	0,65
Потребляемая магнитом мощность, кВт	25	22
Мощность выходного излучения на центральной частоте, кВт: импульсная/средняя	160 / 10	7,7 / 7,7
Полоса по уровню –1 дБ, ГГц	2,4	2,1
Полоса по уровню –3 дБ, ГГц	> 2,7	2,6
Коэффициент усиления, дБ: на центральной частоте / на краях полосы	23 / 20	26 / 19
Длительность импульса	100 мкс	несколько часов

\*Мощность основного высоковольтного источника питания определяется произведением тока пучка на разность ускоряющего и тормозящего напряжений.

чающих требованиям конечных пользователей, обычно на 20÷30 % меньше указанных в табл. 1 величин.

## 5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИРО-ЛБВ

Как было отмечено во введении, развитие исследований в области создания мощных широкополосных усилителей, в том числе и giro-ЛБВ, в настоящее время определяется потребностями совершенствования систем радиолокации, средств связи, а также инструментов для ряда научных исследований, среди которых можно особо выделить спектроскопию высокого разрешения, в том числе спектрометры на ядерном магнитном резонансе с динамической поляризацией ядер. Для систем радиолокации перспективным представляется развитие приборов W-диапазона (на частотах около 95 ГГц, соответствующих одному из окон прозрачности атмосферы), позволяющих расширить рабочую полосу до 8÷10 ГГц и тем самым в несколько раз повысить разрешающую способность таких систем по сравнению с системами  $K_a$ -диапазона. Это открывает новые возможности, в частности, по так называемому радиовидению или радиопортретированию околоземных космических объектов [15]. Для применения в системах связи актуальным является повышение устойчивости изделий к воздействию различных внешних факторов (механических, климатических и других), снижение массо-габаритных показателей, повышение надёжности и ресурса работы. Для спектроскопии достаточно востребованным представляется создание усилителей на частотах 220÷260 ГГц с полосой несколько гигагерц и мощностью десятки-сотни ватт.

Как показывает теоретический анализ, использование для реализации таких перспективных усилителей винтовой giro-ЛБВ даже в «стандартной» сравнительно низкомодовой конфигурации, рассмотренной выше (см. рис. 1 и 2), позволяет реализовать сочетания основных выходных параметров (мощности и полосы частот), практически недостижимых в настоящее время для любых других устройств [35, 42]. Отметим, что продвижению в более высокочастотные диапазоны способствует и ряд сравнительно недавно предложенных или адаптированных применительно к винтовым giro-ЛБВ методов, таких как использование электродинамической системы ввода-вывода СВЧ сигнала через одно сверхразмерное окно [43], использование секционирования пространства взаимодействия с закритической трубкой дрейфа для повышения коэффициента

усиления [36, 44, 45], использование указанных методов в каскаде из двух giro-ЛБВ, позволяющем достичь максимальные показатели не только по мощности и полосе, но и по коэффициенту усиления [35]. В настоящее время начаты «горячие» эксперименты по реализации giro-ЛБВ W-диапазона с секционированным пространством взаимодействия [45], разрабатываются технологии и изготавливаются опытные образцы винтовых структур для giro-ЛБВ на частоте 260 ГГц [38].

Проблемы формирования приосевых электронных пучков [29] стимулируют поиск возможностей использования пучков, формируемых «традиционными» магнетронно-инжекторными пушками. В этой связи можно отметить результаты некоторых расчётов, в частности мощной giro-ЛБВ W-диапазона [35, 44], которые показывают, что конфигурация пучка в винтовой giro-ЛБВ может существенно отличаться от приосевой, а именно, ведущие центры частиц могут располагаться внутри окружности с радиусом не заметно меньше ларморовского радиуса (как показано на рис. 2), а сравнимым с ним и даже несколько превышающим. Как показывают расчёты, ограничение на радиус этого круга (2 на рис. 2), занимаемого ведущими центрами, даже при достаточно больших токах пучка диктуется не возбуждением паразитных колебаний, а только обеспечением адекватного зазора между внешней границей пучка и стенкой структуры (4 на рис. 2). Данное обстоятельство приводит к тому, что подходящий для винтовой giro-ЛБВ пучок топологически может выглядеть как небольшой сектор магнетронно-инжекторного пучка, имеющего такой же, как и азимутальный размер этого сектора, радиальный разброс ведущих центров. В связи с этим может оказаться перспективной так называемая «многоствольная» конфигурация системы, когда несколько равноудалённо расположенных на окружности пучков, эмитируемых эллиптическими областями с общего катода «классической» магнетронно-инжекторной пушки, запитывают каждый свою структуру. В настоящее время проводится детальный анализ такой системы применительно к мощной giro-ЛБВ W-диапазона.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние исследования, а также опыт разработок и испытаний giro-ЛБВ со спирально гофрированными волноводами для конкретных пользователей показал, что одними из основных проблем реализации такого прибора являются недостаточно высокий коэффициент усиления, приводящий к необходимости использования довольно сложных и дорогостоящих предусилителей, а также повышенная критичность к нарушению осевой симметрии электронно-оптической системы, приводящая в конечном итоге к сужению частотной полосы усиления и ограничению мощности выходного излучения. Тем не менее работа на второй гармонике циклотронной частоты, которая даёт качественный выигрыш в используемых магнитных системах («тёплые» соленоиды или постоянные магниты вместо сверхпроводящих систем), в ряде случаев делает винтовые giro-ЛБВ более привлекательными для приложений по сравнению с giro-ЛБВ на основе гладких волноводов с сильными распределёнными потерями. Одним из способов повышения коэффициента усиления может быть «последовательное» секционирование пространства взаимодействия (разбиение его на продольные, не связанные электродинамически секции), а способом, позволяющим использовать менее критичные к возмущениям магнетронно-инжекторные пушки, может быть «параллельное» секционирование, т. е. реализация многоствольной (в терминологии многоручевых клистронов) системы.

Реализованные к настоящему времени giro-ЛБВ K<sub>a</sub>-диапазона позволяют достичь средней или непрерывной мощности выходного излучения около 10 кВт при импульсной мощности до 160 кВт и ширине полосы усиления 2÷3 ГГц. Теоретический анализ наиболее принципиальных аспектов реализации винтовой giro-ЛБВ W-диапазона показывает, что абсолютная ширина полосы может быть расширена до 6÷8 ГГц при сохранении и даже заметном увеличении значений

импульсной (до  $200 \div 300$  кВт) и средней (до  $30 \div 50$  кВт) мощностей. Кроме того, как показывают результаты ряда теоретических исследований [46, 47], gyro-ЛБВ со спирально-гофрированными волноводами перспективны для реализации генераторов ультракоротких когерентных импульсов на основе эффекта пассивной синхронизации мод, которые, в свою очередь, могут представлять интерес для решения некоторых задач спектроскопии.

Работы по исследованию возможностей винтовых gyro-ЛБВ W-диапазона (обсуждаемые в разделах 5 и 6) выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 16–19–10332), остальные работы выполнены при частичном финансировании в рамках госзадания ИПФ РАН (тема 0035–2019–0001).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaponov-Grekhov A. V., Granatstein V. L. Application of High-Power Microwaves. Norwood: Artech House, 1994. 364 p.
2. Thumm M. K. // Int. J. Infr. Millim. Waves. 2001. V. 22, No. 3. P. 377.
3. Barker R. J., Luhmann N. C., Booske J. H., Nusinovich G. S. Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics. Hoboken: Wiley-VCH, 2005. 872 p.
4. Thumm M. K. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. Update 2017. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2018. P. 43.
5. Гапонов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2, № 3. С. 443.
6. Pantell R. H. // Proc. IRE. 1959. V. 47. P. 1146.
7. Chu K. R., Chen H. Y., Hung C. L., et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 4760.
8. Garven M., Calame J. P., Danly B. G., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. P. 885.
9. Pershing D. E., Nguyen K. T., Calame J. P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 947.
10. Wang H., Li H., Luo Y., Yan R. // J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2011. V. 32, No. 2. P. 172.
11. Yan R., Luo Y., Liu G., Pu Y. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59, No. 12. P. 3612.
12. Yan R., Tang Y., Luo Y. // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. V. 61, No. 7. P. 2564.
13. Wang E., Zeng X., Liuet B., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V. 40, No. 7. P. 1846.
14. Yan R., Wang D., Wang J., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65, No. 7. P. 3012.
15. MacDonald M. E., Anderson J. P., Lee R. K., et al. // Lincoln Laboratory Journal. 2014. V. 21, No. 1. P. 106.
16. Blank M., Borchard P., Cauffman S., Felch F. // Digest of Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millim. Waves and 15th Int. Conf. on THz Electronics. 2–9 September 2007, Cardiff, UK. P. 364.
17. Denisov G. G., Cooke S. J. // Digest of 21st Int. Conf. on Infrared and Millim. Waves. 14–19 July 1996, Berlin, Germany. P. AT2.
18. Denisov G. G., Bratman V. L., Phelps A. D. R., Samsonov S. V. // Digest 22nd Int. Conf. on Infrared and Millim. Waves. 20–25 July 1997, Wintergreen, USA. P. 289.
19. Denisov G. G., Bratman V. L., Phelps A. D. R., Samsonov S. V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, No. 3. P. 508.
20. Denisov G. G., Bratman V. L., Cross A. W., et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81, No. 25. P. 5680.
21. Bratman V. L., Cross A. W., Denisov G. G., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84, No. 12. P. 2746.
22. Samsonov S. V., Bratman V. L., Denisov G. G., et al. // Proc. 12th Symp. on High Current Electronics. 24–29 September 2000, Tomsk, Russia. P. 403.
23. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Самсонов С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 2. С. 104.

24. Mishakin S.V., Samsonov S.V., Denisov G.G. // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. V. 62, No. 10. P. 3387.
25. Burt G., Samsonov S.V., Ronald K., et al. // Phys. Rev. E. 2004. V. 70, No. 4. Art. no. 046402.
26. Мишакин С.В., Самсонов С.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 3. С. 195.
27. Mishakin S.V., Samsonov S.V. // IEEE Trans. Microwave Theory Techniques. 2011. V. 59, No. 9. P. 2189.
28. Donaldson C.R., He W., Cross A.W., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37, No. 11. P. 2153.
29. Manuilov V.N., Samsonov S.V., Mishakin S.V., et al. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2018. V. 39, No. 5. P. 447.
30. Samsonov S.V., Denisov G.G., Gachev I.G., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59, No. 8. P. 2250.
31. Самсонов С.В., Гачев И.Г., Денисов Г.Г. и др. // Радиотехника. 2014. № 4. С. 104.
32. Samsonov S.V., Gachev I.G., Denisov G.G., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. V. 61, No. 12. P. 4264.
33. Денисов Г.Г., Богдашов А.А., Гачев И.Г. и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20, № 5. С. 28.
34. CST Particle Studio Overview. <https://www.cst.com/Products/CSTPS>.
35. Samsonov S.V., Bogdashov A.A., Denisov G.G., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64, No. 3. P. 1297.
36. Bratman V.L., Denisov G.G., Kalynova G.I., et al. // Proc. 3rd IEEE Int. Vacuum Electronics Conf., IVEC, 23–25 April 2002, Monterey, USA. P. 359.
37. He W., Donaldson C.R., Zhang L., et al. // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. Art. no. 184801.
38. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Y.K. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27, No. 2. P. 456.
39. Братман В.Л., Калынов Ю.К., Мануилов В.Н., Самсонов С.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 823.
40. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Y.K., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65. P. 2287.
41. Samsonov S.V., Denisov G.G., Gachev I.G., et al. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 149. Art. no. 04002.
42. Mishakin S.V., Bogdashov A.A., Denisov G.G., et al. // Proc. of 9th Int. Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications», 24–30 July 2014, Nizhny Novgorod, Russia. P. 231.
43. Денисов Г.Г., Богдашов А.А., Гачев И.Г., et al. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 10. С. 857.
44. Samsonov S.V., Bogdashov A.A., Denisov G.G., et al. // 18th Int. Vacuum Electronics Conference. 24–26 April 2017, London, UK. Art. no. 8289731.
45. Samsonov S.V., Bogdashov A.A., Denisov G.G., Gachev I.G. // 20th Int. Vacuum Electronics Conference. 29 April–1 May 2019, Busan, Korea. Art. no. 01\_1127.
46. Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., et al. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22, No. 11. Art. no. 113111.
47. Ginzburg N.S., Denisov G.G., Vilkov M.N., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65, No. 6. P. 2334.

Поступила в редакцию 29 мая 2019 г.; принята в печать 30 августа 2019 г.

**STUDIES OF A GYROTRON TRAVELING-WAVE TUBE WITH HELICALLY CORRUGATED WAVEGUIDES AT IAP RAS: RESULTS AND PROSPECTS**

*S. V. Samsonov, A. A. Bogdashov, I. G. Gachev, and G. G. Denisov*

The gyrotron traveling-wave tube (gyro-TWT) is a wideband version of gyrotron amplifiers, which produce pulsed or continuous-wave radiation in the millimeter-wavelength band at the power level that exceeds the powers produced by conventional TWTs with slow-wave structures and rectilinear beams by 1–2 orders of magnitude. Since 1996, researchers at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS) have been developing the concept of the gyro-TWT based on the use of a waveguide with a helically corrugated surface, which changes the dispersion of one of the eigenmodes in a circular waveguide radically. In this paper, we discuss several problems that arise in implementation of such devices, which many years of experimental studies have revealed, present the parameters of gyro-TWTs developed with allowance for specific applications of their end users, and discuss lines of further perfection of such amplifiers.