УДК 537.86

НОВЫЕ СИСТЕМЫ ВВОДА-ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ГИРОТРОННОЙ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Г. Г. Денисов^{1,2}, А. А. Богдашов¹, И. Г. Гачев¹, С. В. Мишакин¹, С. В. Самсонов¹*

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Предложенный ранее метод, позволяющий вводить и выводить микроволновое излучение электровакуумного усилителя через одно барьерное окно, детально рассмотрен применительно к гиротронной лампе бегущей волны на основе волновода с винтовой гофрировкой поверхности. Обсуждаются принципы реализации и характеристики отдельных элементов предлагаемой схемы. Особое внимание уделено разделителю излучения с разными поляризациями, для которого представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований на длинах волн около 6 и 1 мм.

ВВЕДЕНИЕ

Как правило, в мощных электровакуумных усилителях, таких как лампы бегущей волны (ЛБВ), клистроны, гиротронные лампы бегущей волны (гиро-ЛБВ), гироклистроны и др., входной порт, в который подаётся усиливаемый сигнал, и выходной порт, из которого выводится усиленный сигнал, разнесены в пространстве (расположены в разных частях прибора). Кроме того, устройства ввода излучения в мощных приборах (гироклистронах, гиро-ЛБВ) обычно состоят из низкомодовых волноводных элементов, включая барьерные (т. е. отделяющие вакуумное пространство прибора от окружающей среды) окна, с характерными размерами меньше длины волны, в то время как выходное окно имеет диаметр в несколько длин волн [1]. При продвижении таких приборов в коротковолновую область миллиметрового диапазона или в субмиллиметровый диапазон длин волн проблемы, связанные с миниатюризацией узла ввода и возрастанием омических потерь, становятся всё более и более значимыми, что подтверждается рядом экспериментов [2—4]. Использование сверхразмерных или квазиоптических компонентов для транспортировки излучения по, как правило, длинной трассе от источника входного сигнала до узла ввода, как это было реализовано в работе [3], частично помогает снизить омические потери. Однако сложность проблемы обеспечения высокой точности изготовления низкомодовых компонентов со сложной геометрией может серьёзно отразиться на эффективности входного устройства. В работе [5] предложен метод, который позволяет избавиться от отдельного входного окна и тем самым радикально упростить узел ввода сверхвысокочастотного излучения в усилитель. В данной статье этот метод рассматривается применительно к гиро-ЛБВ на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности [6–8]. Кроме того, представлены результаты исследования ряда конкретных компонентов, обеспечивающих работоспособность предложенной схемы.

1.ПРИНЦИП РАБОТЫ НОВОЙ СИСТЕМЫ ВВОДА-ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ГИРО-ЛБВ

Основная идея ввода-вывода излучения через одно окно схематично представлена на рис. 1. Входное излучение в виде линейно-поляризованного (электрическое поле параллельно оси x) гауссова пучка распространяется в направлении +y и, после отражения от разделителя излучения

^{*} samsonov@appl.sci-nnov.ru



Рис. 1. Схема ввода-вывода излучения в гиро-ЛБВ, осуществляющегося через одно окно: продольное сечение системы и ориентация и направление вращения вектора **E** электрического поля волны в соответствующих поперечных сечениях (белой стрелкой показано направление потока энергии входного излучения, серой — выходного). Цифрой 1 обозначен рефлектор (отражатель), 2 — поляризатор, 3 — входное/выходное окно, 4 — разделитель излучения с разными поляризациями, 5 — электронный пучок

с разными поляризациями, проходит сквозь барьерное окно и поступает в вакуумный объём гиро-ЛБВ в направлении -z. Распространяясь вдоль лампы навстречу электронному пучку, входное излучение сначала преобразуется в *x*-поляризованную моду TE_{1,1} круглого волновода. Затем, проходя через поляризатор, эта мода становится циркулярно-поляризованной (направление вращения вектора Е показано на диаграммах пунктирными линиями со стрелками), и далее без существенных искажений проходит через пространство взаимодействия гиро-ЛБВ и отражается назад в ту же моду от осесимметричного отражателя. После такого отражения волна, очевидно, меняет направление распространения с -z на +z, не меняя при этом направления своего азимутального вращения, вследствие чего лево-поляризованная волна становится право-поляризованной. Распространяясь попутно электронному пучку и являясь право-поляризованной, эта волна теперь находится в циклотронном резонансе с вращающимися электронами, вследствие чего происходит её конвективное усиление по мере продвижения в направлении +z. После увеличения амплитуды волна сохраняет вид право-поляризованной моды TE_{1.1} и после прохождения того же поляризатора в обратном направлении, преобразуется в линейно-поляризованную, но уже вдоль оси у, волну ТЕ_{1.1} и покидает вакуумный объём лампы через то же окно в виде у-поляризованного гауссова пучка. Этот пучок с минимальными возмущениями проходит сквозь разделитель поляризаций, не оказывая при этом влияния на входящий волновой пучок.

Наиболее принципиальными условиями реализации данного метода ввода-вывода излучения являются, во-первых, селективное электронно-волновое взаимодействие пучка только с одной циркулярно-поляризованной волной выбранного направления вращения и, во-вторых, минимальное возмущение входящей волны на пути её распространения до отражателя. К сожалению, этим условиям удовлетворяют далеко не все разновидности усилителей. Очевидно, что под указанные критерии не попадают, например, приборы черенковского типа с прямолинейными пучками (по крайней мере, наиболее распространённые варианты слаборелятивистских ЛБВ), а также

гиро-ЛБВ и гироклистроны, работающие на осесимметричных модах [9, 10]. Кроме того, практически во всех гироклистронах пространство дрейфа между резонаторами выполнено таким образом, чтобы максимально уменьшить электродинамическую связь между ними. Поэтому усиливаемый сигнал в данном случае не сможет попасть с выходного сечения гироклистрона на его вход. Аналогичная ситуация возникает и для большинства разновидностей гиро-ЛБВ, активно исследующихся и в настоящее время [11–14], в которых в пространстве электронно-волнового взаимодействия используются волноведущие структуры, обладающие большими «холодными» потерями (до 40÷50 дБ за один проход). Таким образом, данный метод может быть эффективным только для гиро-ЛБВ, работающих на циркулярно-поляризованных модах с незначительным «холодным» затуханием внутри пространства взаимодействия.

Наиболее привлекательным использование данного метода представляется в случае гиро-ЛБВ на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности, которые в настоящее время активно исследуются в ИПФ РАН (г. Нижний Новгород, Россия) и Университете Стратклайда (г. Глазго, Великобритания) [15–17]. Отметим, что наиболее освоенная к сегодняшнему дню и успешно испытанная в ряде экспериментов конфигурация таких гиро-ЛБВ включает волноведущую структуру (спирально-гофрированный волновод, ограниченный с обоих концов участками с плавными переходами на волновод с круглым сечением), на входе и выходе которой используется циркулярнополяризованная мода TE_{1.1}. В данном случае волна рабочего вращения (направление рабочего вращения задаётся ориентацией винта гофрировки и направлением продольного магнитного поля), попутная электронному пучку, преобразуется на входном участке структуры в нормальную волну винтового волновода, эффективно взаимодействует с электронным пучком и после обратного преобразования на выходном участке структуры покидает рабочее пространство в виде той же вращающейся моды $TE_{1,1}$ с большей амплитудой. При этом та же мода $TE_{1,1}$, но с противоположным направлением вращения, распространяющаяся попутно пучку, или мода с тем же направлением вращения, но распространяющаяся навстречу пучку, не испытывают существенного воздействия как со стороны пучка, так и со стороны гофрировки. Таким образом, очевидно, что для указанного прибора использование обсуждаемой схемы ввода-вывода излучения (см. рис. 1) не приведёт к принципиальным трудностям.

2. ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМЫ

Рассмотрим конкретную реализацию основных элементов рассматриваемой схемы и требования к характеристикам этих элементов. Отметим, что прежде всего нас интересуют усилители миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью от сотен ватт до сотен киловатт и шириной частотной полосы до 5–10 %.

2.1. Отражатель

Как показано в предыдущих работах по исследованию гиро-ЛБВ на основе винтовых волноводов, для обеспечения их устойчивой работы используются так называемые приосевые электронные пучки, для которых максимальное удаление частиц от оси не превышает ларморовского диаметра. Из-за такой малости поперечного размера пучка в качестве простейшего отражателя в рассматриваемой схеме (см. рис. 1) можно использовать закритическое для моды TE_{1,1} сужение круглого волновода. Кроме того, эффективным решением, обеспечивающим коэффициент отражения выше 95 % (при максимуме, близком к 100 %) в частотной полосе около 10 %, является отражатель в виде одиночной канавки с прямоугольным профилем [18] с диаметром, близким к критическому для моды TM_{1,1}, и соответствующей длиной. При этом минимальный диаметр

Г. Г. Денисов, А. А. Богдашов, И. Г. Гачев и др.

859

такого отражателя примерно в 1,5 раза превышает критический диаметр для моды TE_{1,1}, что, по сравнению с вариантом закритического рефлектора, устраняет одно из возможных мест паразитного токооседания электронного пучка.

2.2. Поляризатор

Важнейшим элементом рассматриваемой схемы является поляризатор, расположенный на выходе пространства взаимодействия (см. рис. 1). В предположении отсутствия примеси волны нерабочего вращения на выходе винтовой структуры гиро-ЛБВ и идеальности разделителя излучения с разными поляризациями именно от эффективности поляризатора зависит, какая часть выходного излучения (мощность которого в 100÷1000 раз больше мощности входного) будет поступать в виде обратной волны в канал входного источника. Расчёты, подтверждающиеся измерениями, показывают, что в большинстве случаев для моды TE_{1,1} достаточно эффективным может оказаться поляризатор в виде сравнительно короткой (2÷3 длины волны) секции волновода с эллиптическим сечением, ограниченной с обоих концов плавными переходами на волновод с круглым сечением. При среднем диаметре немного меньше критического для моды TM_{1,1} такая структура обеспечивает уровень кросс-поляризации ниже –27 дБ в полосе 7 %. При большем диаметре, видимо, возможна реализация и более широкополосных решений, однако при этом возникает опасность того, что критические частоты высших мод окажутся внутри рабочей полосы частот, что может серьёзно ухудшить характеристики поляризатора.

Следует также отметить, что поляризатор должен находиться перед барьерным окном гиро-ЛБВ, т. к. в этом случае он существенно ослабляет негативное влияние неизбежных отражений от окна на самовозбуждение данного усилителя. Действительно, если проанализировать схему замыкания цепи обратной связи, потенциально приводящей к самовозбуждению гиро-ЛБВ, то окажется, что для этого необходимо три «холостых» пробега волны вдоль структуры (два навстречу и один попутно) и, соответственно, два отражения от окна. Таким образом, при прочих идеальных характеристиках элементов системы коэффициент линейного усиления будет ограничен величиной R^{-2} , где R — коэффициент отражения от окна (или нагрузки) по мощности.

2.3. Разделитель излучения с разными поляризациями

Ещё одним важным компонентом обсуждаемой системы ввода-вывода является разделитель излучения с разными поляризациями. Как следует из предполагаемого принципа действия данного элемента, он должен иметь по меньшей мере три разнесённых в пространстве порта, в которые и из которых может поступать сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение. В идеальном случае излучение на выходе из гиро-ЛБВ имеет линейную поляризацию с определённым направлением и должно беспрепятственно доходить до выходного порта разделителя, в то время как излучение, поступающее из источника, должно попадать на тот же вход/выход гиро-ЛБВ с таким же модовым составом, но с линейной поляризацией, ортогональной линейной поляризации выходящего излучения (см. рис. 2).

Помимо омических потерь, наиболее очевидной неидеальностью такого устройства является паразитное рассеяние излучения, приводящее к попаданию части выходного излучения на входной порт, «просачиванию» входного излучения на выход разделителя, изменению модового состава излучения, а также к отражению части излучения как в усилитель, так и во входной источник. В нашем случае, когда такой разделитель излучения с разными поляризациями используется на выходе усилителя, при его разработке, как правило, необходимо учитывать следующие ограничивающие факторы: часть излучения, попадающего с выхода гиро-ЛБВ в порт входного источника,

не должна по мощности превышать нескольких процентов от входного излучения (с учётом того, что мощность выходного излучения превышает мощность входного в $100 \div 1000$ раз); коэффициент отражения выходного излучения не должен превышать $0,1 \div 0,2$ %. При этом коэффициент отражения по входному сигналу может быть заметно больше (до $3 \div 5$ %), и, кроме того, условия на величину потерь входного излучения из-за «просачивания» на выход устройства могут быть также достаточно мягкими (до $5 \div 10$ % по мощности).

В данной работе спроектированы и исследованы два разделителя излучения с разными поляризациями, существенно отличающиеся друг от друга использованными в них эффектами и рабочими диапазонами частот. Первый разделитель предназначен для работы в средней части миллиметрового диапазона длин волн (на центральной частоте около 45 ГГц) при уровне средней или непрерывной мощности выходного излучения порядка 10 кВт (см. рис. 2). Разделяющим излучение с разными поляризациями элементом в данном случае является решётка из медных проводников [19], периодически расположенных в плоскости, наклонённой под углом 45° к оси гиро-ЛБВ. Портами разделителя являются гофрированные волноводы с диаметром 40 мм с так называемой импедансной гофрировкой поверхности (канавки с глубиной $\lambda/4$ и периодом $\lambda/3$, где λ — длина волны излучения), по которым распространяется линейно-поляризованная мода HE_{1.1}. Использование такой моды, характеризующейся очень малыми полями на стенках, и сверхразмер-



Рис. 2. Разделитель излучения с разными поляризациями для длины волны 6 мм на основе решётки из проводников и волноводов на моде HE_{1,1}. Белыми стрелками показано направление распространения энергии входного, серыми — выходного излучения, чёрными тонкими стрелками — ориентация электрического поля в соответствующих волнах. Цифрой 1 обозначено излучение из гиро-ЛБВ, 2 — в гиро-ЛБВ, 3 — излучение из входного источника, 4 — выходное излучение

ных волноводов позволяет существенно уменьшить паразитное рассеяние в данной системе.

Основными параметрами, по которым оптимизировались характеристики рассматриваемого разделителя излучения с разными поляризациями, являлись толщина и период расположения проводников решётки. Очевидно, что при этом необходимо найти компромисс между высокой «прозрачностью» решётки для волны с перпендикулярной поляризацией, на которой переносится большая мощность, и в то же время достаточно эффективным отражением от этой решётки входящей волны с параллельной поляризацией. В данном случае диаметр проводников 0,5 мм и период их следования 2,3 мм обеспечивал, согласно расчётам, очень малый (менее 0,1%) коэффициент отражения и небольшие (1,5÷4 %) потери по выходной волне (включая омические потери и рассеяние в другие моды), и приемлемые значения коэффициента отражения (около 1 %) и потерь (12÷16 %) по мощности входного излучения в полосе частот около 10 %. При этом электропрочность данного устройства остаётся очень высокой (при расчётных параметрах критическая для СВЧ пробоя напряжённость электрического поля 30 кВ/см соответствует выходной мощности около 1 МВт). Следует отметить, что, вследствие идеальной симметрии расчётной системы относительно одной из плоскостей, часть выходного излучения, попадающая в порт входного сигнала, может иметь только ортогональную входной волне поляризацию. Поэтому, если входное излучение поступает по одномодовому каналу, например стандартному волноводу с прямоугольным сечением, то выходное излучение в расчётах не может попасть во входной канал. В реальности мощность выходного излучения, попадающего во входной канал, будет зависеть от





Рис. 3. Измеренные характеристики разделителя излучения с разными поляризациями для длин волн около 6 мм: коэффициент прохождения выходного излучения усилителя по мощности через разделитель (кривая 1 на панелях a, δ); мощность части излучения, попадающего с выхода усилителя на вход источника входного сигнала (кривая 2, a); коэффициент передачи по мощности от входного источника на вход/выход усилителя (кривая 2, δ); коэффициент отражения выходного излучения от разделителя (b), P и $P^{\rm R}$ — относительные мощности прошедшего и отражённого излучения соответственно

точности изготовления и юстировки системы.

Как показали эксперименты с изготовленным разделителем излучения разных поляризаций, удаётся обеспечить достаточно хороший уровень (лучше 40 дБ) развязки выходного и входного излучений (см. рис. 3a). При этом коэффициенты прохождения (кривая 1 на рис. 3a, δ) и отражения выходной волны (рис. 3e), а также коэффициент ввода входной мощности (кривая 2 на рис. 3δ) оказываются близки к расчётным. При измерениях данных характеристик использовались идентичные друг другу преобразователи из низшей моды прямоугольного волновода с сечением $5,2 \times 3,6$ мм в моду $\text{HE}_{1,1}$ гофрированного волновода. При этом «изрезанность» частотных характеристик коэффициентов прохождения (рис. 3δ) в диапазоне частот $46,5\div48$ ГГц в значительной степени определяется ограниченностью рабочей полосы данных преобразователей.

Второй разделитель излучения с разными поляризациями, исследованный в данной работе, предназначен для использования в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн (на центральной частоте 260 ГГц) при уровне мощности непрерывного излучения на выходе усилителя порядка сотен ватт (см. рис. 4). Работа данного разделителя основана на эффекте Тальбота, возникающем при распространении параксиальных волновых пучков с апертурой, много большей длины волны, в многомодовых волноведущих структурах с характерным размером поперечного сечения, в несколько раз превышающим ширину волнового пучка [20–22].

В данном случае, как и в предыдущем варианте разделителя, рабочее излучение во всех трёх портах устройства распространяется в виде моды HE_{1,1} круглого гофрированного волновода с диаметром по меньшей мере в 4÷5 длин волн. Разделитель представляет собой волновод с прямоугольным сечением с шириной, приблизительно в 2 раза большей, и высотой, примерно равной диаметру входных/выходных волноводов. Для обеспечения выполнения граничных условий, необходимых для распространения волнового пучка с вертикальной поляризацией, на

Г. Г. Денисов, А. А. Богдашов, И. Г. Гачев и др.

862

нижнюю и верхнюю стенки волновода нанесена импедансная гофрировка. Как известно [22], при распространении симметричного (в данном случае относительно оси y) параксиального волнового пучка в таком волноводе на определённых расстояниях происходит его расслоение (в данном случае нас интересует раздвоение) на несколько идентичных пучков, которые затем вновь собираются в один пучок с исходным поперечным распределением поля. При этом оказывается, что из-за различных граничных условий на боковых (параллельных плоскости yz) стенках волновода для пучков с y- и x-поляризацией координата такого «раздвоения» пучка с горизонтальной поляризацией в два раза больше, чем для пучка с вертикальной поляризацией. Это обстоятельство использовано в предлагаемом варианте разделителя, полная длина которого составляет примерно $2a^2/\lambda$, где a — ширина волновода, и посередине которого под углом 45° расположено зеркало с пириной, примерно равной диаметру пучка. Как схематично показано на рис. 4, волновой пучок с горизонтальной поляризацией, раздваиваясь, огибает это зеркало, в то время как пучок с вертикальной поляризацией после раздвоения принимает на этой длине исходный вид и полностью перенаправляется зеркалом в порт входного источника.

В данной работе количественный анализ указанного устройства был выполнен с помощью упрощённых методов, основанных на модовом представлении волновых пучков (без учёта эффектов рассеяния и отражения на неоднородностях), а также с использованием трёхмерного моделирования на основе конечно-разностного алгоритма решения уравнений Максвелла во временной области (FDTD), реализованного в программном пакете «CST Microwave Studio» [23]. В результате расчётов была найдена оптимальная геометрия разделителя излучения с разными поляризациями. В частности, для частоты 260 ГГц при диаметре волноводов во входных/выходных портах, равном 5 мм, оптимальные размеры прямоугольного волновода оказались следующими:



Рис. 4. Разделитель излучения с разными поляризациями коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн на основе квазиоптических параксиальных волновых пучков и эффекта Тальбота. Обозначения стрелок аналогичны рис. 2, цифрой 5 обозначены импедансные стенки, 6 — поглотители



Рис. 5. Расчётные характеристики разделителя излучения с разными поляризациями на частоте 260 ГГц: (a) коэффициент прохождения выходного излучения усилителя через разделитель по мощности (кривая 1), коэффициент передачи излучения по мощности от входного источника на вход/выход усилителя по мощности (кривая 2); (б) коэффициент отражения от разделителя по выходному (кривая 1) и входному (кривая 2) излучению. Здесь P — относительная мощность прошедшего излучения, $P^{\rm R}$ — относительная мощность отражённого излучения

ширина 11 мм, высота 5,5 мм, длина 201 мм, а зеркало с проекцией на плоскость xz в виде квадрата со сторонами по 5,8 мм расположено на расстоянии 99 мм по оси z. Параллельные плоскости xy торцевые поверхности в компьютерной модели были покрыты слоем поглотителя, предотвращающим интерференцию части излучения, не попадающей в соответствующие порты. В качестве основного материала стенок использован металл с проводимостью в 1,6 раза ниже проводимости чистой меди. В результате трёхмерного моделирования данного разделителя излучения с разными поляризациями было установлено, что коэффициенты прохождения выходного и входного излучения составляют $80 \div 93$ %, а коэффициенты отражения не превышают -30 дБ в полосе частот около 7 % (см. рис. 5). Поэтому такой разделитель представляется достаточно перспективным для использования в качестве устройства ввода-вывода излучения гиро-ЛБВ с мощностью непрерывного выходного до нескольких сотен ватт. В ближайшее время планируется завершить изготовление и провести «холодные» измерения данного устройства.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что метод ввода-вывода излучения через одно окно может быть успешно реализован для гиро-ЛБВ на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности. При коэффициенте усиления гиро-ЛБВ, не превышающем 20÷25 дБ, возможна реализация необходимых компонентов системы для высокого уровня мощности с шириной полосы частот до 7 % без использования невзаимных элементов (таких как ферритовые фазовращатели, циркуляторы и т.п.). Теоретические и экспериментальные исследования двух разновидностей разделителя излучения с разными поляризациями показывают перспективность их использования для гиро-ЛБВ коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14–29–00192).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Barker R. J., Booske J. H., Luhmann N. C., et al. Modern microwave and millimeter-wave power electronics. Wiley-IEEE Press, 2005. 872 p.
- 2. Song H. H., McDermott D. B., Hirata Y., et al. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11, No. 5. P. 2935.
- 3. Nanni E. A., Lewis S. M., Shapiro M. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111, No. 23. P. 235101.
- Blank M., Borchard P., Cauffman S., Felch F. // Digest of Joint 32nd Int. Conf. Infrared and Millim. Waves and 15th Int. Conf. TH Electronics, 2–9 Sept. 2007, Cardiff, UK. P. 364.
- Denisov G. G., Samsonov S. V., Mishakin S. V., Bogdashov A. A. // IEEE Electron Dev. Lett. 2014. V. 35, No. 7. P. 789.
- Denisov G. G., Bratman V. L., Phelps A. D. R., Samsonov S. V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998.
 V. 26, No. 3. P. 508.
- 7. Bratman V. L., Cross A. W., Denisov G. G., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84, No. 12. P. 2746.
- Братман В. Л., Денисов Г. Г., Самсонов С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 2. С. 104.
- 9. Garven M., Calame J. P., Danly B. G., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30, No. 3. P. 885.
- Засыпкин Е.В., Гачев И.Г., Антаков И.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 341.
- 11. Chu K. R., Chen H. Y., Hung C. L., et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81, No. 21. P. 4760.
- Pershing D. E., Nguyen K. T., Calame J. P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 3. P. 947.
- Wang H., Li H., Luo Y., Yan R. // Int. J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2011. V. 32, No. 2. P. 172.
- 14. Yan R., Tang Y., Luo Y. // IEEE Trans. Electron Dev. 2014. V. 61, No. 7. P. 2564.
- Mishakin S. V., Bogdashov A. A., Denisov G. G., et al. // Proc. of 9th Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", July 24–30, 2014, Nizhny Novgorod— Perm—Nizhny Novgorod, Russia. P. 231.
- Samsonov S. V., Gachev I. G., Denisov G. G., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2014. V. 61, No. 12. P. 4264.
- Whyte C. G., Ronald K., Young A. R., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V. 40, No. 5. P. 1303.
- Denisov G. G., Lukovnikov D. A., Samsonov S. V. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16, No. 4. P. 745.
- 19. Petit R., Botten L. C. Electromagnetic theory of gratings. Berlin: Springer-Verlag, 1980. 284 p.
- 20. Ривлин Л. А., Шильдяев В. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 4. С. 572.
- Bratman V. L., Denisov G. G., Ginzburg N. S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24, No.3. P. 744.
- Denisov G. G., Kuzikov S. V. // Proc. Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas", August 2–9, 1999, Nizhny Novgorod. V. 2. P. 960.
- 23. https://www.cst.com/Products/CSTMWS.

Поступила в редакцию 25 мая 2015 г.; принята в печать 22 сентября 2015 г.

NEW RADIATION INPUT/OUTPUT SYSTEMS FOR MILLIMETER-WAVE GYROTRON TRAVELING-WAVE TUBES

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

We consider in detail the method allowing one to input and output microwave radiation produced by an electrovacuum amplifier through the same barrier window, which was proposed earlier, in the context of its application in a traveling-wave tube based on a waveguide with a helically corrugated surface. Special attention is given to the splitter of differently polarized radiation, and the results of studying this splitter at wavelengths of about 6 and 1 mm theoretically and experimentally are presented.