

ГИБРИДНЫЙ СВЧ-ГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ ВИРКАТОРА С НЕЛАМИНАРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕКЦИЕЙ

© 2019 г. Ю. А. Калинин^а, А. В. Стародубов^{а,*}, А. С. Фокин^а

^а Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

*e-mail: StarodubovAV@gmail.com

Поступила в редакцию 19.09.2018 г.

После доработки 03.02.2019 г.

Принята к публикации 07.02.2019 г.

Приведены результаты исследования СВЧ-генератора на основе виркатора с неламинарным электронным пучком и с протяженной согласованной секцией спиральной замедляющей системы. Показано, что в предложенной схеме коэффициент полезного действия достигает 20% при полосе частот 1–3 ГГц.

DOI: 10.1134/S0367292119070059

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время устройства на основе электронных пучков с виртуальным катодом (ВК) являются предметом активных исследований в области вакуумной СВЧ-электроники [1]. Указанные источники СВЧ-излучения интересны в силу ряда характерных особенностей, в том числе простоты конструкции, возможности легкого управления режимами генерации за счет изменения управляющих параметров, низких требований к качеству электронного пучка, возможности работы в отсутствие внешнего магнитного поля и т.п. Известно, что модуляция пролетного тока электронного пучка может осуществляться осциллирующим ВК [2, 3]. Последнее позволяет использовать такие пучки с целью как генерации [4, 5], так и усиления широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний.

Представляет интерес гибридный СВЧ-генератор, в котором промодулированный с помощью ВК электронный поток поступает в замедляющую систему, построенную по типу лампы обратной волны. Этот гибридный генератор получил название виртода [3, 6, 7].

В данной работе рассматриваются вопросы повышения коэффициента полезного действия (КПД), а также расширения рабочей полосы частот гибридного СВЧ-генератора, построенного по схеме, которая включает в себя низковольтный виркатор и секцию с протяженным отрезком согласованной спиральной замедляющей системы, построенную по принципу усилительной

секции лампы бегущей волны. Таким образом, исследуемый гибридный СВЧ-генератор представляет собой модернизацию низковольтного виркатора посредством включения в его конструкцию протяженного отрезка спиральной замедляющей системы. Показано, что такая модернизация положительным образом сказывается на характеристиках гибридного СВЧ-генератора. В исследуемом гибридном устройстве формируется неламинарный электронный пучок, характеризующийся наличием разброса электронов по скоростям.

2. ИССЛЕДУЕМЫЙ МАКЕТ ГИБРИДНОГО ПРИБОРА

На рис. 1а представлен эскиз исследуемого гибридного СВЧ-генератора. В конструкцию генератора включена также протяженная труба дрейфа, внутри которой располагается протяженный отрезок широкополосной спиральной замедляющей системы (СЗС) с аномальной дисперсией с выводом СВЧ-энергии и коллектором. Вокруг протяженной трубы дрейфа сформирована внешняя магнитная периодическая фокусирующая система. На рис. 1б приведено схематичное изображение сечения внутреннего пространства протяженной трубы дрейфа с целью пояснения особенности крепления протяженного отрезка согласованной СЗС. Отрезок протяженной согласованной СЗС закрепляется в трубе дрейфа посредством диэлектрических опор, расположенных на внутренних металлических ребрах трубы

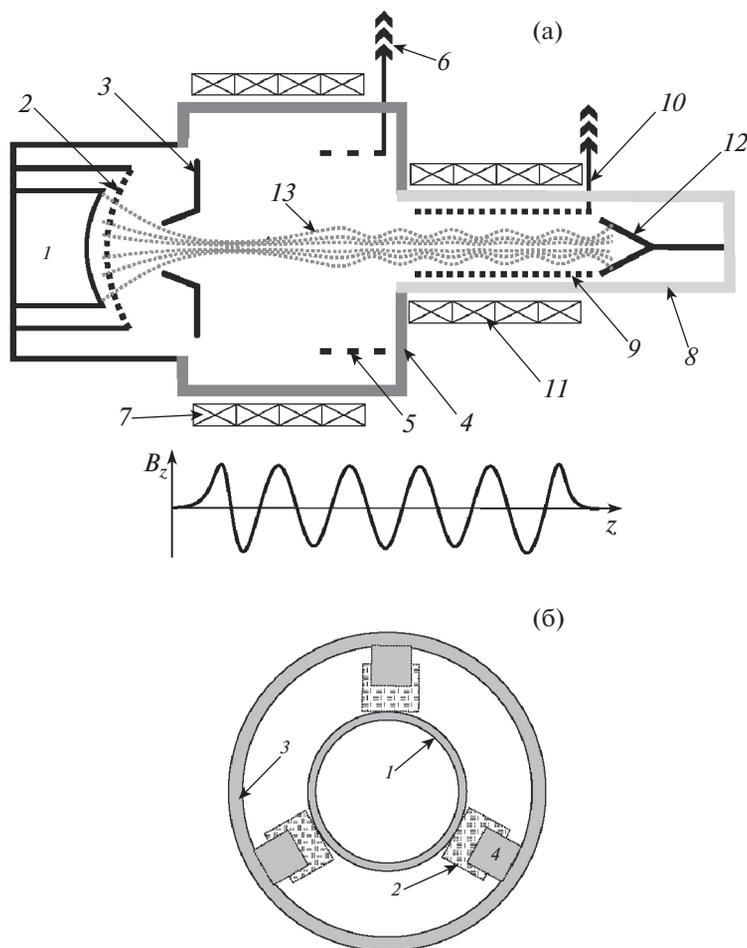


Рис. 1. а) – эскиз исследуемого гибридного СВЧ-генератора на основе виркатора. 1 – сферический катод, 2 – модулирующая сетка, 3 – анод, 4 – короткая труба дрейфа, 5 – короткий отрезок согласованной СЗС, 6 – вывод СВЧ-энергии с короткого отрезка согласованной СЗС, 7 – внешняя магнитная периодическая фокусирующая система, 8 – протяженная труба дрейфа, 9 – протяженный отрезок согласованной СЗС с аномальной дисперсией, 10 – вывод СВЧ-энергии с протяженного отрезка согласованной СЗС, 11 – внешняя магнитная периодическая фокусирующая система, 12 – коллектор, 13 – качественное изображение электронного пучка. б) – схематичное изображение сечения протяженной трубы дрейфа. 1 – протяженный отрезок согласованной СЗС, 2 – диэлектрические опоры, 3 – корпус протяженной трубы дрейфа, 4 – внутренние металлические ребра протяженной трубы дрейфа.

дрейфа. Экспериментально измеренные дисперсионные характеристики используемой СЗС (зависимость коэффициента замедления $n = c/V_{ph}$ от частоты f) приведены в таблице 1.

Дисперсия такой спиральной замедляющей системы является аномальной вследствие имеющейся азимутальной неоднородности экрана: приближение экрана к спирали имеет место лишь в отдельных точках – точках крепления спирали к

диэлектрическим опорам. Таким образом, азимутальная неоднородность экрана обусловлена наличием в диэлектрических опорах металлических элементов в виде внутренних ребер трубы дрейфа (комбинированные металлодиэлектрические опоры). Другим возможным вариантом азимутальной неоднородности экрана может быть выточка в диэлектрических опорах пазов и установка в изготовленные пазы диэлектрических опор металлических стержней, что также приближает металлический экран к спирали в точках крепления спирали к диэлектрическим опорам, создавая также азимутальную неоднородность экрана. Следует отметить, что комбинированные металлодиэлектрические опоры способствуют снижению диэлектрической нагрузки на спираль, а так-

Таблица 1. Измеренная в эксперименте дисперсионная характеристика протяженного отрезка согласованной СЗС

f , ГГц	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$n(f)$	12.4	12.2	11.8	11.6	11.4	11.2

же улучшают тепловой контакт между диэлектрической опорой и корпусом, что особенно важно для приборов с высокой выходной мощностью.

Разработка СВЧ-генераторов на неламинарных электронных пучках требует решения ряда задач [8–10], одной из которых является формирование сгустков пространственного заряда (СПЗ), характеризующихся большой плотностью тока (j/j_0 порядка 300–400, где j_0 – плотность тока на входе в трубу дрейфа, а j – плотность тока только в сгустке в трубе дрейфа). Указанная задача может быть решена, см., например, [10–13], в случае формирования электронного пучка с использованием катодно-сеточных структур, формирующих существенный разброс электронов по скоростям, применением внешней фокусирующей магнитной системы, использованием в качестве источников электронных пучков магнетронно-инжекторных пушек. В данной работе сгустки пространственного заряда формировались в пространстве дрейфа за счет внешнего магнитного поля, а также разброса электронов по продольным скоростям.

Электронный пучок, эмитируемый с катода сферической формы, проходит далее через модулирующую сетку и приобретает разброс по продольным скоростям (порядка 30% по результатам экспериментальных измерений энергоанализатором методом тормозящего поля на выходе из анодного отверстия). Фокусировка электронного пучка осуществляется за счет подобранной кривизны поверхности катода, а также воздействия внешнего магнитного поля. Распространяясь далее в пространстве дрейфа, быстрые электроны догоняют медленные, образуя тем самым сгустки пространственного заряда. Фокусирующее действие внешнего магнитного поля приводит к уменьшению поперечных размеров образующихся сгустков пространственного заряда (в результате сжатия магнитным полем), что в свою очередь ведет к росту плотности тока в сгустке. Провисание потенциала в сгустке пространственного заряда обеспечивает отражение части первичного электронного пучка в обратном направлении. В этом случае СПЗ играют роль виртуального катода (ВК). В области реального катода также формируется ВК за счет торможения отраженных от сгустков пространственного заряда электронов, в результате чего вновь формируется прямой (от катода) поток электронов. Таким образом, СПЗ, отражая часть электронного пучка назад, способствуют формированию двухпоточкового состояния в электронном пучке.

Так как электроны после прохождения модулирующей сетки приобретают разброс по продольным скоростям, то какая-то часть электронного потока отражается от СПЗ, а другая часть пронизывает их, изменяя на время пролета через

СПЗ плотность тока в них. Таким образом, распределение потенциала внутри СПЗ изменяется во времени. Колебания высоты потенциального барьера вблизи СПЗ приводят к тому, что попеременно то пропускается, то отражается электронный пучок, в результате чего распространяющийся через СПЗ пучок является промодулированным по плотности (чередующиеся области с повышенной и пониженной электронной плотностью). Одновременно в обратном направлении движется промодулированный по плотности отраженный пучок, который является противофазным прямому. Отметим, что в отличие от группировки клистронного типа, при которой осуществляется модуляция пучка по скорости, переходящая затем в модуляцию по плотности после прохождения трубы дрейфа, СПЗ модулируют пролетную и отраженную части пучка сразу по плотности. Такая модуляция более предпочтительна, чем клистронная, поскольку обеспечивает большую глубину модуляции по плотности при меньших продольных габаритах устройства. “Глубоко” промодулированный пролетный электронный пучок может возбуждать различные электродинамические системы.

Как указано на рис. 1а, в исследуемой схеме имеется отрезок протяженной согласованной с двух концов широкополосной спиральной замедляющей системы с аномальной дисперсией. Промодулированный сгустками пространственного заряда электронный пучок возбуждает в протяженном отрезке спиральной замедляющей системы СВЧ-поле, которое, в свою очередь, воздействует на электронный пучок. Этот процесс происходит на всем протяжении СЗС. Скорость электронов при этом должна быть близка к фазовой скорости волны в СЗС, тем самым СВЧ-поле волны должно сопровождать электроны по длине отрезка СЗС, обеспечивая кумулятивный процесс энергообмена между пучком и СВЧ-полем. Поток мощности непрерывно нарастает от левого конца к правому концу отрезка СЗС и далее выводится через широкополосный коаксиальный вывод СВЧ-энергии.

Эффективный энергообмен между электронным пучком, промодулированным сгустками пространственного заряда, и возбуждаемым им полем в СЗС может иметь место лишь при достаточно протяженной области взаимодействия (при коротких отрезках СЗС взаимодействие между электронным пучком и возбуждаемым им полем в СЗС неэффективно). В такой системе отбор кинетической энергии у электронных сгустков происходит не локальным (как в резонаторных структурах), а распределенным образом по всей длине отрезка спиральной замедляющей системы, и, таким образом, обеспечить на всей длине отрезка СЗС состояние сгустка близкое к идеальному становится все менее возможным. Это

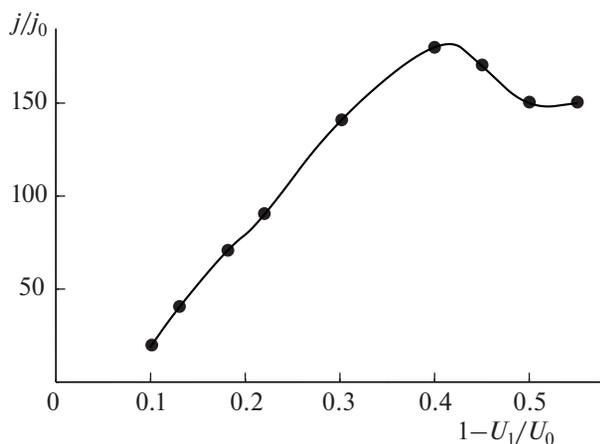


Рис. 2. Результаты численного моделирования. Зависимость плотности тока в сгустке пространственного заряда от соотношения потенциала ускоряющего анода U_0 и потенциала короткой трубы дрейфа U_1 . j_0 – плотность тока на входе в короткую трубу дрейфа (область ВК), j – плотность тока только в сгустке.

связано с наличием разброса электронов по скоростям, а также кулоновских сил расталкивания, следствием чего является “размазывание” электронных сгустков. Последнее приводит к тому, что одна часть электронного пучка будет находиться в тормозящих фазах СВЧ-поля, а другая – в ускоряющих. Это является причиной меньшей эффективности согласованных отрезков СЗС по сравнению с резонаторами. Однако согласованные отрезки СЗС обладают важным достоинством, связанным с тем, что при близости значений скорости электронов и фазовой скорости электромагнитной волны условие взаимодействия электронов с полем будет выполняться в широкой полосе частот (при соответствующей дисперсионной характеристике ЗС). Последнее означает, что виркатор с достаточно протяженной секцией СЗС должен обладать большей широкополосностью, чем без нее.

Важной проблемой генераторов с ВК является проблема отбора СВЧ-энергии у колеблющихся электронных сгустков. Традиционные подходы с использованием рупорных выводов, коротких отрезков СЗС характеризуются низким КПД по причине неэффективного взаимодействия с полем колеблющегося сгустка – они характеризуются либо узкополосностью, не позволяющей захватывать высшие гармоники сгруппированного тока сгустка, либо, как в случае с короткими отрезками СЗС, применяемыми в низковольтных виркаторах и генераторах с турбулентными электронными пучками, характеризуются величиной безразмерной длины замедляющей системы $\theta = 2\pi CN \leq 0.3-0.4$ (где C – параметр усиления Пирса, N – число замедленных длин волн), обес-

печивающей малое возмущение пучка [14]. Использование протяженного согласованного отрезка СЗС, имеющего значение безразмерной длины $\theta = 7-8$, позволяет осуществлять эффективный отбор энергии у промодулированного по плотности электронного пучка и, таким образом, способствует увеличению КПД прибора.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчет группировки электронного пучка в короткой трубе дрейфа осуществлялся в статическом режиме по методике, описанной в [15, 16]. Под статическим режимом в данном случае понимается отсутствие учета зависимости вычисляемых величин от времени. Расчет непараксиальных неламинарных траекторий пучка проводился на основе решения уравнений движения [17]. Предполагается, что пучок электронов является аксиально-симметричным. В модели электронный пучок разбивается на N заряженных слоев толщиной dr , вложенных друг в друга, каждый из которых заменяется бесконечно тонким заряженным цилиндром. Каждому цилиндру присваивается ток I_j . Решая уравнения движения, можно получить представление о форме траекторий пучка. Для подсчета напряженности электрического поля, созданного пространственным зарядом, привлекалась теорема Гаусса. Численное решение осуществлялось методом Рунге-Кутты 4-го порядка. На рис. 2 представлена зависимость плотности тока j/j_0 в СПЗ (где j – плотность тока только в электронном сгустке, j_0 – плотность тока на входе в короткую трубу дрейфа) от соотношения потенциала анода $U_0 = \text{const}$ и потенциала короткой трубы дрейфа U_1 . Расчет проводился при величине магнитного поля $B_0 = 0.05$ Тл и разбросе электронов по продольным скоростям $\Delta V/V_0 = 0.3$. Видно, что максимальная плотность тока в СПЗ достигает $j/j_0 = 180$ при $U_1/U_0 = 0.6$.

На рис. 3 показаны изменение плотности тока только в сгустке, а также отношения максимального и минимального радиусов электронного пучка к радиусу короткой трубы дрейфа в зависимости от величины магнитного поля. Максимальная величина j_{max}/j_0 достигает значения $j_{\text{max}}/j_0 \approx 450$, при этом существенно уменьшаются (при больших B_0) поперечные размеры пучка. Уменьшение поперечных размеров электронного пучка ведет к росту объемной плотности заряда, способствуя увеличению плазменной частоты колебаний ВК, что приводит к возрастанию частоты генерируемого выходного СВЧ-сигнала.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на разборной вакуумной установке в импульсном режиме (дли-

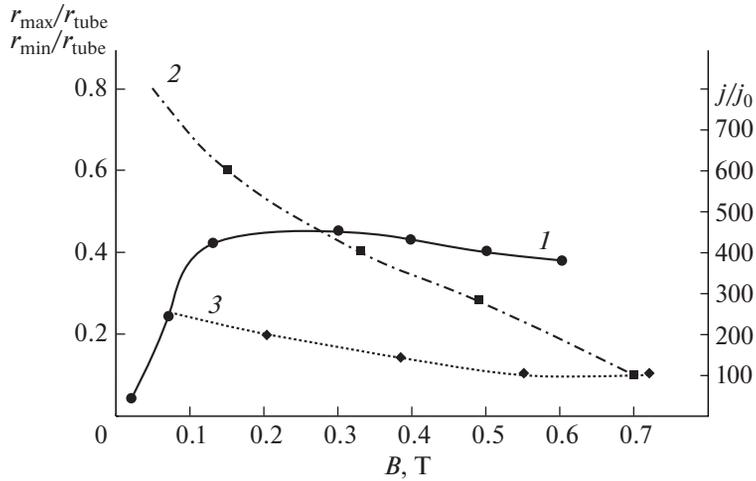


Рис. 3. Зависимость плотности тока j/j_0 (кривая 1), а также максимального (2) и минимального (3) радиусов пучка в пространстве короткой трубы дрейфа от амплитуды магнитного поля B при $U_1/U_0 = 0.6$.

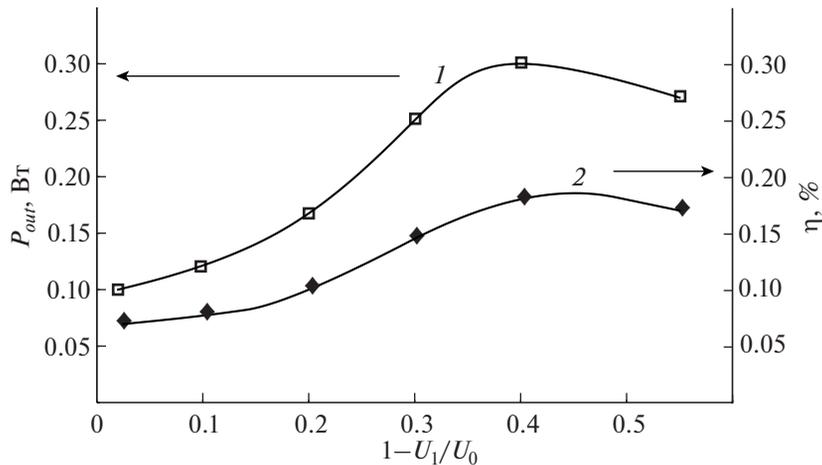


Рис. 4. Зависимость выходной мощности (кривая 1) и КПД (кривая 2) виркатора от соотношения потенциала ускоряющего анода U_0 и потенциала трубы дрейфа U_1 при $B = 0.06$ Тл без учета протяженного отрезка согласованной СЗС.

тельность импульса $\tau = 50$ мкс, скважность $Q = 1000$) по методике, приведенной в [14]. Все элементы исследуемого устройства размещались в откачной камере разборной вакуумной установки. Откачка камеры осуществляется в два этапа: сначала – с помощью форвакуумных насосов для предварительной откачки, на заключительном этапе – с помощью магнитноразрядных насосов до давления $10^{-6} - 10^{-7}$ Торр. Все измерения осуществлялись при непрерывной откачке (при минимальном давлении остаточных газов $10^{-6} - 10^{-7}$ Торр). Ускоряющее напряжение U_0 было 2 кВ и в процессе эксперимента не изменялось ($U_0 = \text{const}$), ток пучка составлял $I = 0.08$ А, и, таким образом, импульсная мощность равнялась $P =$

$= 160$ Вт. Амплитуда магнитного поля составляла $B = 0.06$ Тл. Длина короткого отрезка СЗС $l_1 = 0.02$ м, радиус короткого отрезка СЗС $r_1 = 0.01$ м (безразмерная длина $\theta \approx 0.4$ для частоты 3 ГГц), длина протяженного согласованного отрезка СЗС $l_2 = 0.2$ м, его радиус $r_2 = 0.005$ м, шаг спирали $h_2 = 0.0025$ м (величина безразмерной длины замедляющей системы $\theta \approx 7 - 8$ для частоты 3 ГГц).

Схема электрического питания макета гибридного генератора была следующей. От источника ускоряющего напряжения потенциал U_0 подавался на анод. Используя делитель напряжений от источника ускоряющего напряжения, потенциал в 400 В подавался на модулирующую сетку, а также отдельно на короткую трубу дрейфа, причем

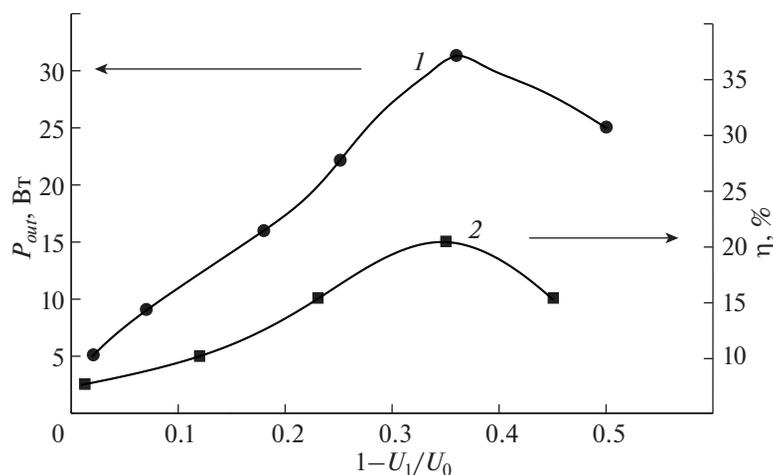


Рис. 5. То же, что на рис. 4, с учетом протяженного отрезка согласованной СЗС.

потенциал короткой трубы дрейфа U_1 изменялся от значения U_0 до $0.5 U_0$. Протяженная труба дрейфа, протяженный отрезок СЗС, а также коллектор находились под одним потенциалом, равным ускоряющему потенциалу U_0 .

Были проведены измерения разброса электронов по продольным скоростям методом тормозящего поля на выходе из анодного отверстия при потенциале модулирующей сетки в 400 В. Измерения проводились с использованием энергоанализатора, основными элементами его конструкции являются диафрагма и коллектор, выполненный в виде цилиндра Фарадея, на который подавался необходимый задерживающий потенциал [14, 18, 19]. В процессе эксперимента осуществлялись измерения тока коллектора в зависимости от поданного на него задерживающего потенциала, и по полученным зависимостям определялся разброс электронов по продольным скоростям. Анализ полученных результатов показал, что разброс электронов по продольным скоростям на выходе из анодного отверстия достигает порядка 30% при потенциале модулирующей сетки в 400 В.

Регистрация спектров мощности выходных сигналов осуществлялась посредством подключения коаксиальных кабелей к широкополосным коаксиальным выводам энергии отрезков согласованных СЗС. Для регистрации спектров мощности использовали цифровой анализатор спектра Agilent Technologies ESA-E Series Spectrum Analyzer E4402B (9.1 кГц–3.0 ГГц). Измерение мощности с короткого и протяженного отрезков спиральных замедляющих систем проводилось с подключением двухканального измерителя мощности Agilent Technologies N1912A P-Series Power Meters (измерительная головка N1921A P-Series wideband power sensor, от 50 МГц до 18 ГГц) по-

средством коаксиального кабеля к широкополосному коаксиальному выводу энергии соответствующего отрезка СЗС. На рис. 4 представлена зависимость выходной мощности (кривая 1) и КПД (кривая 2) виркатора без учета протяженного отрезка согласованной СЗС (сигнал регистрировался только с вывода энергии короткого отрезка согласованной СЗС (5 на рис. 1а)). Видно, что при таких параметрах электронного пучка и $U_1/U_0 = 0.6$ выходная мощность достигает 0.3 Вт (кривая 1) при КПД $\approx 0.18\%$ (кривая 2). На рис. 5 представлена выходная мощность, измеренная с коаксиального вывода энергии протяженного со-

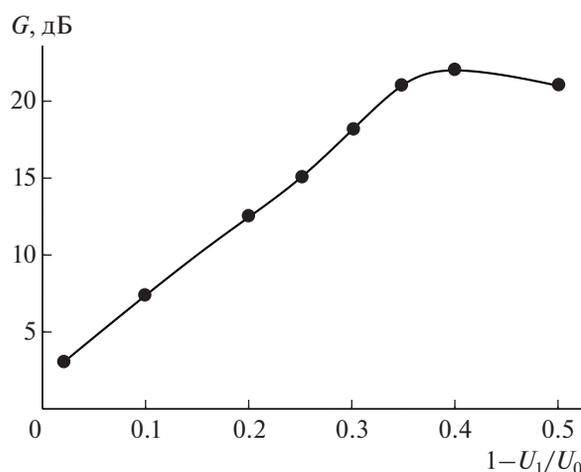


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления $G = 10 \lg(P_2/P_1)$ (где P_2 – мощность на выходе протяженного отрезка согласованной СЗС, P_1 – мощность на выходе короткого отрезка согласованной СЗС) от соотношения потенциала ускоряющего анода U_0 и потенциала короткой трубы дрейфа U_1 при $V = 0.06$ Тл.

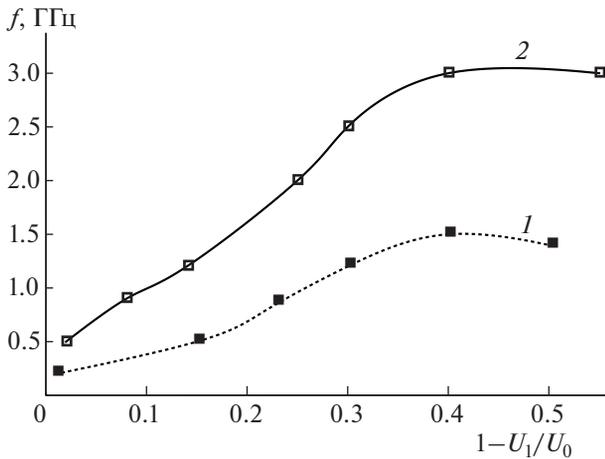


Рис. 7. Зависимость максимальной частоты генерации в спектре мощности выходного сигнала от соотношения потенциала ускоряющего анода U_0 и потенциала трубы дрейфа U_1 при регистрации сигнала с короткого отрезка согласованной СЗС (кривая 1) и при регистрации сигнала с протяженного отрезка согласованной СЗС (кривая 2).

гласованного отрезка СЗС (9, рис. 1а). Видно (кривая 1), что выходная мощность достигает 32 Вт при КПД порядка 20% (кривая 2). Экспериментально измеренная величина коэффициента усиления $G = 10\lg(P_2/P_1)$, где P_2 – мощность на выходе протяженного согласованного отрезка СЗС, P_1 – мощность на выходе короткого отрезка СЗС) составляет порядка 20 дБ (рис. 6). Отметим, что для получения вышеуказанных результатов на рис. 6 один канал используемого измерителя мощности подключался к широкополосному коаксиальному выводу энергии короткого отрезка СЗС, и таким образом, регистрировалось значение P_1 . Второй канал измерителя мощности подключался к широкополосному коаксиальному выводу энергии протяженного отрезка СЗС, и регистрировалось значение P_2 . На рис. 7 приведены результаты анализа спектров мощности сигналов, регистрируемых с короткого и протяженного отрезков СЗС. Проведенный анализ показал, что виркатор с коротким согласованным отрезком СЗС характеризуется полосой генерации с максимальной частотой 1–1.2 ГГц, в то время как наличие протяженного согласованного отрезка СЗС расширяет максимальную частоту генерации до 3 ГГц. На рис. 8 для наглядности приведены примеры спектров мощности выходного сигнала, снятых с вывода энергии короткого отрезка согласованной СЗС и протяженного отрезка согласованной СЗС.

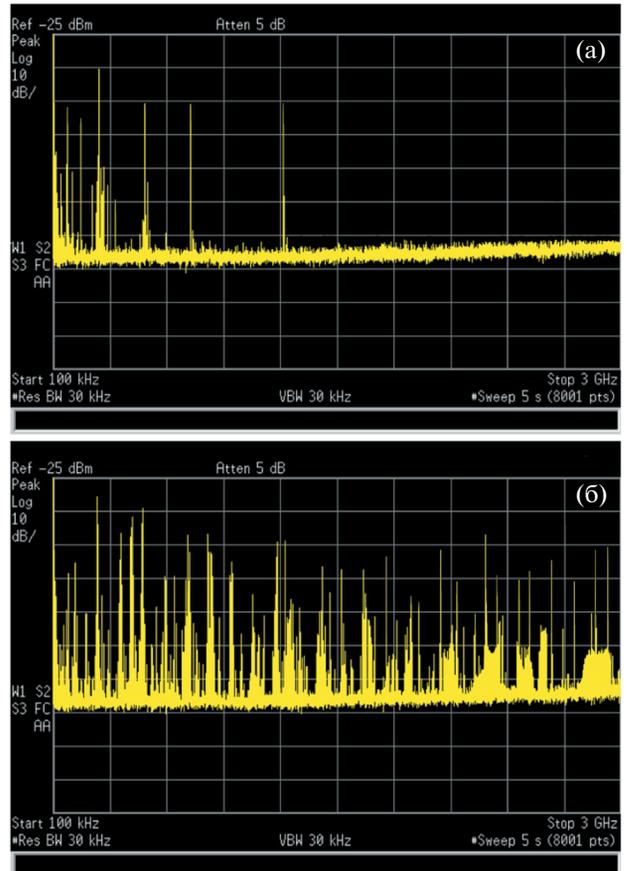


Рис. 8. Спектры мощности выходного сигнала, полученные при регистрации сигнала с короткого отрезка согласованной СЗС (а) и при регистрации сигнала с протяженного отрезка согласованной СЗС (б) для значений $B = 0.06$ Тл, $U_1/U_0 = 0.6$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что система, включающая в себя виркатор с турбулентным электронным пучком и секцией с протяженным отрезком согласованной СЗС с безразмерной длиной $\theta \approx 7-8$, обладает большей эффективностью по сравнению с системой, в которой такой секции нет. Виркатор в данном случае служит для глубокой модуляции электронного пучка по плотности, а секция с протяженным согласованным отрезком СЗС обеспечивает длительное взаимодействие электронного пучка с полем. Большая эффективность выражается в увеличении выходной мощности на величину порядка 20 дБ, росте КПД до 20%. Кроме того, расширяется полоса частот выходного сигнала за счет появления дополнительных спектральных составляющих.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-02-00757, а также при поддержке Ми-

нистерства образования и науки РФ в рамках проектной части госзадания (проект № 3.859.2017/4.6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Benford J., Swegle J. A., Schamiloğlu E.* High Power Microwaves, 3rd ed. Series in Plasma Physics. CRC Press / Taylor and Francis Group, 2016.
2. *Курилко В.Ч., Файнберг Я.Б.* // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. С. 689.
3. *Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Дубинов Е.Е., Коновалов И.В., Тихонов А.В.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 14. С. 25. doi: 10.1134/1.1388951
4. *Селемир В.Д., Алехин Б.В., Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Степанов Н.В., Шамро О.А., Шибалко К.В.* // Физика плазмы. 1994. Т. 20. С. 689.
5. *Alyokhin B.V., Dubinov A.E., Selemir V.D., Shamro O.A., Shibalko K.V., Stepanov N.V., Vatrunin V.E.* IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 22. P. 945. doi: 10.1109/27.338312
6. *Гадецкий Н.П., Магда И.И., Найстер С.И., Прокопенко Ю.В., Чумаков В.И.* // Физика плазмы. 1993. Т. 19. С. 530.
7. *Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Михеев К.Е., Селемир В.Д., Тараканов В.П.* // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 541. doi: 10.1134/1.1768583
8. *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 1009. doi: 10.1134/1.2131130
9. *Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Kalinin Yu.A., Kurkin S.A., Starodubov A.V., Hramov A.E.* // Phys. Lett. A. 2014. V. 378. P. 2423. doi: 10.1016/j.physleta.2014.06.031
10. *Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Птицын Б.Г., Евсеенко А.А., Ефимова И.А., Лятегин В.А., Нургалеев Р.К., Степанов Н.В., Шилин К.С., Ячный А.В.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 125. doi: 10.1134/1.1758344
11. *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Фокин А.С.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 187. doi: 10.1134/S1063780X17020076
12. *Kalinin Yu.A., Starodubov A.V., Fokin A.S.* // Physics of Wave Phenomena. 2012. V. 20. No. 3. P. 193. doi: 10.3103/S1541308X12030053
13. *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Муштаков А.В.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 92. doi: 10.1134/S1063784211060090
14. *Калинин Ю.А., Ессин А.Д.* Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ-электронике. Саратов: Изд-во СГУ, 1991.
15. *Калинин Ю.А., Волкова Л.Н.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 14. С. 65. doi: 10.1134/S1063785010070254
16. *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 19. С. 52. doi: 10.1134/S1063785010100081
17. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
18. *Afanas'ev V.I., Lukin K.A., Rakitynsky V.A.* // Telecommunications and Radio Engineering. 1997. V. 51. No. 6–7. P. 148. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v51.i6-7.240
19. *Калинин Ю.А., Стародубов А.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 80. doi: 10.1134/S1063784210120133