

Мощный клистрон с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона с кольцевым электронным потоком

В. Е. Родякин,^{1, а} В. М. Пикунов,¹ В. Н. Аксенов^{1, 2, б}

¹ Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук».

Россия, 140700, Московская область, Шатура, ул. Святоозерская, д. 1.

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет и Международный учебно-научный лазерный центр. Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, д. 1.

Поступила в редакцию 02.11.2020, после доработки 13.01.2021, принята к публикации 26.01.2021.

Представлены результаты теоретического исследования мощного многорезонаторного клистрона с распределенным взаимодействием на частоту 95 ГГц с кольцевым электронным пучком. Численные исследования проводились с использованием программного комплекса PARS с учетом теплового разброса скоростей электронов на катоде. В результате исследований и оптимизации параметров была разработана конструкция электронно-оптической системы и системы взаимодействия шестирезонаторного клистрона, обеспечивающего рекордную для данной частоты выходную мощность 8.6 кВт с коэффициентом усиления 56 дБ, электронным КПД 32% и полным КПД 26%. С использованием разработанного двухступенчатого коллектора с пониженным потенциалом с эффективностью рекуперации 54% в динамическом режиме возможно обеспечить полный КПД прибора на уровне 40%.

Приводятся результаты численных расчетов динамики электронов и их взаимодействия с электромагнитными полями от катода до коллектора в квазитрехмерном приближении.

Ключевые слова: кольцевые электронные пучки, электронная пушка, многозаярные резонаторы, комплекс программ PARS, клистроны с распределенным взаимодействием, электровакуумные приборы, пространственный заряд, коллектор с пониженным потенциалом.

УДК: 53.06, 537.5, 621.385.624. PACS: 41.75.Fr, 85.45.Bz, 84.40.-x.

ВВЕДЕНИЕ

Бурно растущие потребности в компактных мощных источниках СВЧ излучения вызвали в последние годы интенсивное освоение миллиметрового диапазона. Поэтому повышение мощности традиционных электровакуумных усилителей и генераторов в этом диапазоне является актуальной задачей [1]. Среди них наиболее перспективны приборы с продольным взаимодействием, к которым относятся лампы бегущей волны (ЛБВ) и клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ).

Из-за малых размеров сечения пролетного канала в миллиметровом диапазоне для увеличения мощности приборов приходится переходить к использованию электронных потоков с высокими значениями плотности тока в пучке (более 1 кА/см²) [2], а также распределенных потоков (многолучевых, кольцевых и ленточных электронных пучков).

Традиционным лидером в области разработки мощных КРВ миллиметрового диапазона является канадская компания CPI. Разработчикам этой компании удалось достигнуть выходной импульсной мощности КРВ W-диапазона 2 кВт при электронном КПД 20% [3]. Общий КПД прибора был увеличен до 32% за счет одноступенчатой рекуперации в коллекторе. В клистроне использовался плотный аксиально-симметричный цилиндрический электронный пучок с общей мощностью 9.3 кВт.

Значительных практических успехов в области использования ленточных электронных потоков в КРВ W-диапазона добились специалисты Исследовательской лаборатории ВМС США (Naval Research

Laboratory, NRL). Ими был разработан и совместно с сотрудниками компании CPI протестирован КРВ с ленточным электронным пучком общей мощностью 70 кВт на частоту 94 ГГц с выходной импульсной мощностью 7.5 кВт и электронным КПД 8.6% [4]. Общий КПД разработанного КРВ составил 17.2% за счет использования одноступенчатой рекуперации энергии в коллекторе с пониженным потенциалом. Однако сложности, связанные с формированием и фокусировкой ленточных электронных пучков, а также опасность возникновения диокотронной неустойчивости и разрушения таких пучков ограничивают величину их силы тока при использовании в КРВ миллиметрового диапазона.

В работе [5] была представлена конструкция магнитно-экранированной высокопервиансной электронной пушки с коэффициентом компрессии, равным 125, обеспечивающая формирование плотного кольцевого электронного пучка (до 2 кА/см²) с силой тока 2.2 А и ускоряющим напряжением 15 кВ. В продолжение этой работы были проведены теоретические исследования возможности разработки эффективной системы взаимодействия мощного КРВ на частоту 95 ГГц, который по совокупности параметров смог бы превзойти существующие КРВ на цилиндрических и ленточных электронных пучках в данном диапазоне. Выбранные в результате проведенного в работе [5] рассмотрения параметры электронного пучка и магнитного поля для разработанного КРВ приведены в табл. 1.

При анализе и оптимизации всех узлов прибора использовался программный комплекс PARS, разработанный авторами [6] на основе модернизации

^а E-mail: vrodyakin@mail.ru

^б E-mail: v.aks@mail.ru

Таблица 1. Исходные параметры КРВ

Параметр	Значение	Ед. измерения
Рабочая частота, f_0	95	ГГц
Ускоряющее напряжение, V_0	15	кВ
Сила тока, I_0	2.2	А
Мощность немодулированного пучка, P_0	33	кВт
Радиус трубы, R_T	0.28	мм
Радиус пучка, R_n	0.22	мм
Фокусирующее магнитное поле, B_Φ	1.0	Тл

программы «Арсенал-МГУ», зарекомендовавшей себя в нашей стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки и исследований многочисленных клистронных усилителей [7–13].

1. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КРВ

На рис. 1, б изображена общая конструкция разработанного прибора, а также структура электростатических полей, рассчитанных в результате итераций по пространственному заряду в приборе, работающем в статическом режиме (без СВЧ-сигнала).

Численный анализ проводился для теплового электронного пучка с температурой катода 1100 К с использованием 880 трубок тока для дискретизации электронного потока с катода. Для учета влияния теплового разброса поперечных скоростей электронов на катоде использовался специальный алгоритм, описанный в работе [14]. Траектории электронов

и эквипотенциали электрического поля, установившиеся в результате итераций по пространственному заряду, показаны на рис. 2.

Как видно из рисунка, разработанная электронно-оптическая система электронной пушки обеспечивает сжатие эмитированного катодом электронного пучка с минимальными пульсациями и его плавный ввод в систему взаимодействия прибора. Система взаимодействия разработанного КРВ состоит из шести многоззорных резонаторов. Оседание обработанных в системе взаимодействия электронов происходит в коллекторе с пониженным потенциалом. В разработанном приборе была использована схема двухступенчатой рекуперации с отражательной иглой, имеющей потенциал катода. В результате теоретических расчетов была определена конструкция коллектора, оптимальная для работы как в статическом, так и в динамическом режимах. Изображенные на рисунке траектории показывают, что в статическом режиме в системе взаимодействия клистрона не происходит оседания электронов на стенки трубы дрейфа, а все электроны достигают коллектора и оседают на его второй ступени. Таким образом, в разработанной конструкции обеспечивается 100%-е токопрохождение сформированного электронного потока в статическом режиме.

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРОВ

При выборе конфигурации электродинамических систем КРВ учитывались особенности технологии изготовления элементов резонаторных структур

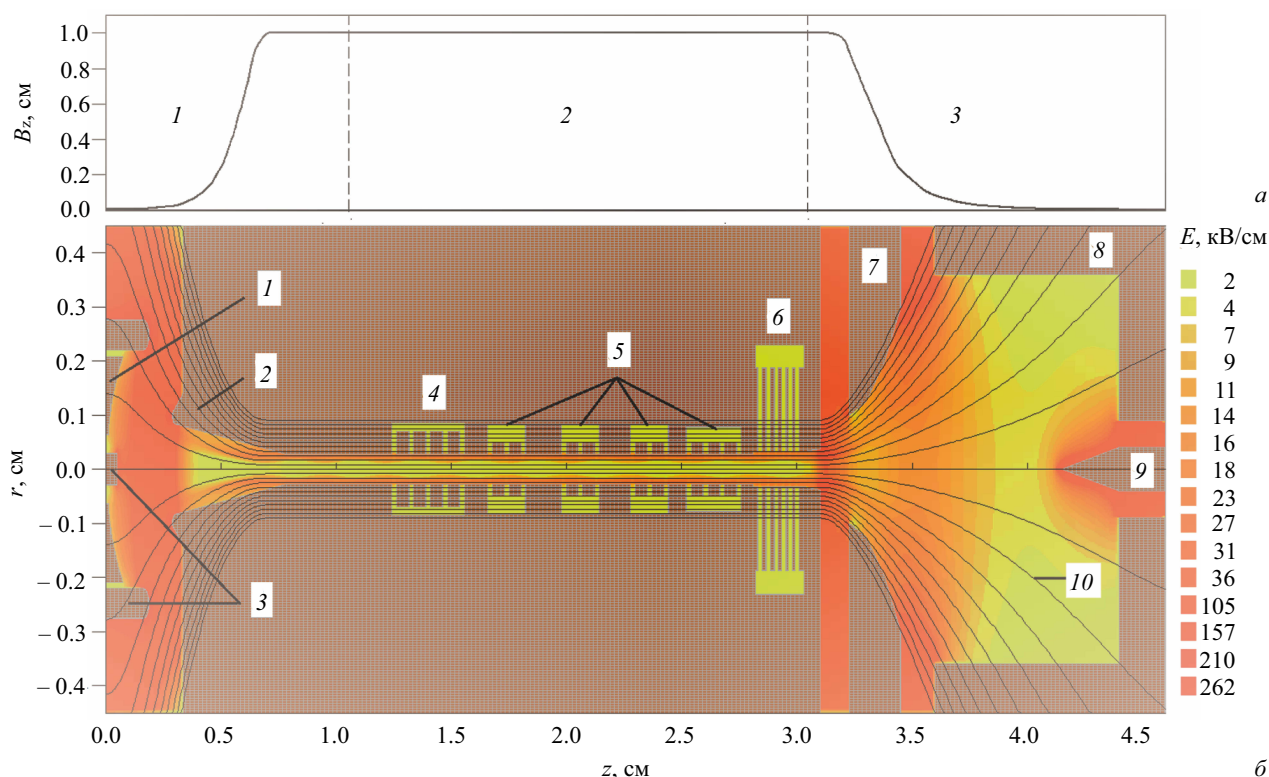


Рис. 1. а — Осевое распределение фокусирующего магнитного поля в области электронной пушки (1), системе взаимодействия (2) и коллекторе (3); б — конструкция разработанного КРВ: 1 — катод ($U = -V_0$), 2 — анод ($U = 0$), 3 — фокусирующие электроды ($U = -V_0$), 4 — входной резонатор, 5 — промежуточные резонаторы, 6 — выходной резонатор, 7 — 1-я ступень коллектора ($U = -0.3V_0$), 8 — 2-я ступень коллектора ($U = -0.8V_0$), 9 — отражательная игла ($U = -V_0$), 10 — силовые линии фокусирующего магнитного поля

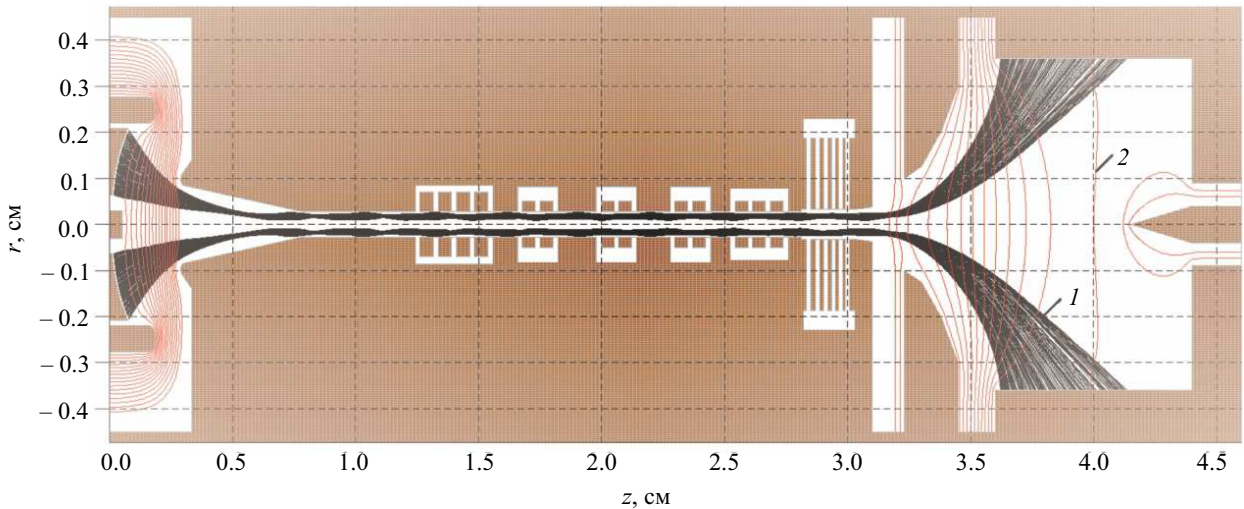


Рис. 2. Рассчитанные траектории электронов (1) и эквипотенциальные линии электростатических полей (2) в разработанном КРВ в статическом режиме

в W-диапазоне, связанные с их малыми размерами. Перспективными с этой точки зрения являются планарные электродинамические структуры лестничного типа [1, 15]. Для их анализа необходимы трехмерные программы. Однако предварительные оценки эквивалентных параметров можно провести на примере аксиально-симметричных резонаторных систем с использованием хорошо зарекомендовавшего себя 2.5D-комплекса программ PARS. Среди аксиально-симметричных структур вместо традиционных тороидальных резонаторов были использованы цилиндрические резонаторы, которые легче изготовить и которые обладают лучшими характеристиками с точки зрения опасности вакуумного пробоя. Ширина зазора для всех резонаторов была выбрана равной 0.2 мм. Это значение соответствует фазовому углу пролета зазора $\theta_d = 96^\circ$ и является компромиссным между обеспечением эффективности взаимодействия, технологичностью изготовления и опасностью вакуумного пробоя. Для обеспечения эффективной модуляции в качестве входного резонатора была выбрана пятизаярная конструкция. Использование однозаярных резонаторов в качестве промежуточных резонаторов нецелесообразно по причине низкого значения волнового сопротивления, что требует большого количества резонаторов для эффективной группировки электронного потока. Дополнительным обстоятельством, не позволяющим использовать такие однозаярные резонаторы в качестве промежуточных, является опасность вакуумного пробоя. По этим причинам в качестве промежуточных резонаторов после серии проведенных исследований и расчетов были выбраны трехзаярные и четырехзаярные цилиндрические резонаторы. При расчетах не учитывались дополнительные вставки, удерживающие внутренние трубки резонаторов. Их влияние можно исследовать с помощью 3D спектральных программ. Однако, как показывает опыт использования программы PARS, применение двумерных программ для оценки электродинамических параметров и анализа структуры электрических полей в пролетном канале подобных резонаторных структур вполне оправдано [16, 17].

На рис. 3, а представлена конструкция и распределение электрического поля основного вида колебаний четырехзаярного резонатора. На рис. 3, б приведены рассчитанные продольные распределения аксиальной компоненты электрического поля основного вида колебаний на внутреннем (пунктирная кривая) и внешнем (сплошная кривая) радиусах электронного пучка.

Как видно из рисунка, основным видом колебаний данного резонатора является 2π -вид. Данный четырехзаярный резонатор, по сравнению с однозаярным, имеет в два раза большее значение собственной добротности ($Q = 1200$) и в 3.5 раза большее значение волнового сопротивления ($R/Q = 95 \text{ Ом}$). Кроме того, поскольку возбуждаемое в резонаторе напряжение распределяется между четырех зазоров, данная конструкция обеспечивает при относительном напряжении $0.4V_0$ максимальную амплитуду электрического поля $228 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$, что является приемлемым значением с точки зрения опасности вакуумного пробоя при импульсном режиме работы прибора.

Для обеспечения эффективного отбора энергии в качестве выходного резонатора была выбрана шестизаярная конструкция, работающая на π -виде колебаний. Выбор данного вида колебаний в качестве рабочего обусловлен ограничением со стороны длины последней трубы дрейфа между выходным и предвыходным резонаторами. Как было показано в работе [18], эффективность группирования электронов в сгустки в клистронах в основном определяется безразмерным параметром пространственного заряда:

$$\Omega_q = \frac{1 + \gamma_0}{2\sqrt{\gamma_0}} \left(\frac{\omega_q}{\omega} \right), \quad (1)$$

где $\gamma_0 = 1 + \frac{\eta_e V_0}{c^2}$ — релятивистский фактор, c — скорость света в вакууме, $\omega = 2\pi f_0$, $\eta_e = \frac{e}{m_0}$ — отношение заряда e к массе покоя m_0 отдельного электрона, $\omega_q = R_p \omega_p$ — редуцированная плазменная частота, R_p — коэффициент редукиции плазменной частоты, $\omega_p = \frac{\eta_e \rho_0}{\varepsilon_0}$ — плазменная частота электронного потока, ρ_0 — средняя плотность заряда

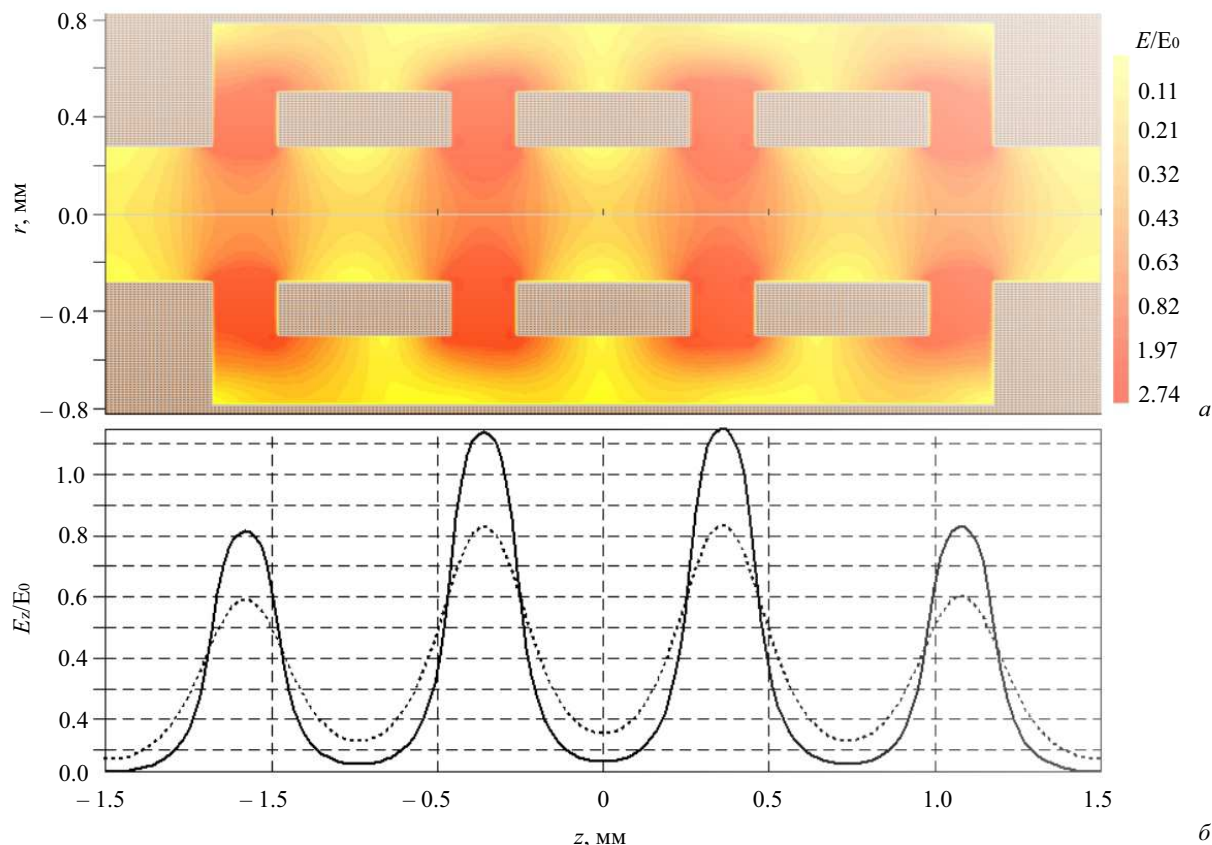


Рис. 3. Конструкция четырехзазорного резонатора и распределение электрических полей основного вида колебаний (а). Распределение продольной составляющей электрического поля на внутреннем (пунктирная кривая) и на внешнем (сплошная кривая) радиусах пучка (б)

в электронном потоке, ε_0 — электрическая постоянная. Для выбранных параметров кольцевого электронного потока $\Omega_q = 0.065$. Как следует из результатов работы [18], для данного значения параметра пространственного заряда расстояние между центрами выходного и предпоследнего резонаторов $L_{\text{вых}}$ в клистрионах не должно превышать 20% от редуцированной плазменной длины волны:

$$L_q = \frac{\gamma_0(1 + \gamma_0)}{2\Omega_q} L_e, \quad (2)$$

где $L_5 = 2\pi \frac{u_0}{\omega_0}$ — электронная длина волны, $u_0 = \frac{\sqrt{1+\gamma_0}}{\gamma_0} \sqrt{\eta_e V_0}$ — скорость электронов немодулированного пучка. Для выбранных исходных параметров КРВ (табл. 1) $L_q = 1.2$ см, $L_e = 0.075$ см. Минимальное значение $L_{\text{вых}}$ для четырехзазорного предпоследнего и шестизазорного выходного резонаторов для основного 2π -вида колебаний равно $L_{\text{вых}} = 4.5L_e = 0.3375$ см, что составляет 28% от L_q и превышает допустимое значение 20%. Для π -вида $L_{\text{вых}} = 3.25L_e = 0.2435$ см и составляет 20%, что позволяет обеспечить эффективное группирование в предвыходном модуле КРВ.

Рассчитанное волновое сопротивление выходного резонатора на рабочем π -виде колебаний составляет 52 Ом, а значение собственной добротности 880. Ближайший по частоте вид колебаний имеет частоту 94.1 ГГц и достаточно удален от естественной полосы усиления КРВ. Распределение напряжения между шестью зазорами позволяет работать выбранной конструкции в импульсном режиме без риска

вакуумного пробоя. Принимая во внимание, что сформированные группирователем сгустки электронов в выходном резонаторе будут тормозиться и терять свою скорость, шаг ячеек электродинамической структуры был выбран с монотонным уменьшением к концу выходной системы. Это незначительно ухудшило ее электродинамические параметры, но позволило обеспечить синхронизацию взаимодействия тормозящегося электронного потока с электромагнитными полями выходного резонатора и увеличить эффективность энергоотбора.

3. СИСТЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРВ

При использовании результатов расчетов электронной пушки и электродинамических систем был проведен расчет системы взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов исследуемого КРВ. В результате оптимизационных расчетов были определены параметры системы взаимодействия (табл. 2), позволяющие обеспечить высокую выходную мощность при заданных исходных параметрах.

На входе в систему взаимодействия использовались данные расчета электронной пушки с учетом теплового разброса поперечных составляющих скоростей электронов на катоде с температурой $T_k = 1100$ К. Рассчитанные структуры собственных полей резонаторов и их параметров использовались при моделировании взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями резонаторов. При численных расчетах каждый электронный период

Таблица 2. Параметры системы взаимодействия разработанного КРВ

Резонаторы	1	2	3	4	5	6
Собственная частота, ГГц	95.000	95.005	95.007	95.01	95.011	95.000
Нагруженная добротность	300	900	900	900	1200	300
Волновое сопротивление, Ом	90	75	75	75	95	52
Вид колебаний	2π	2π	2π	2π	2π	π
Количество зазоров	5	3	3	3	4	6

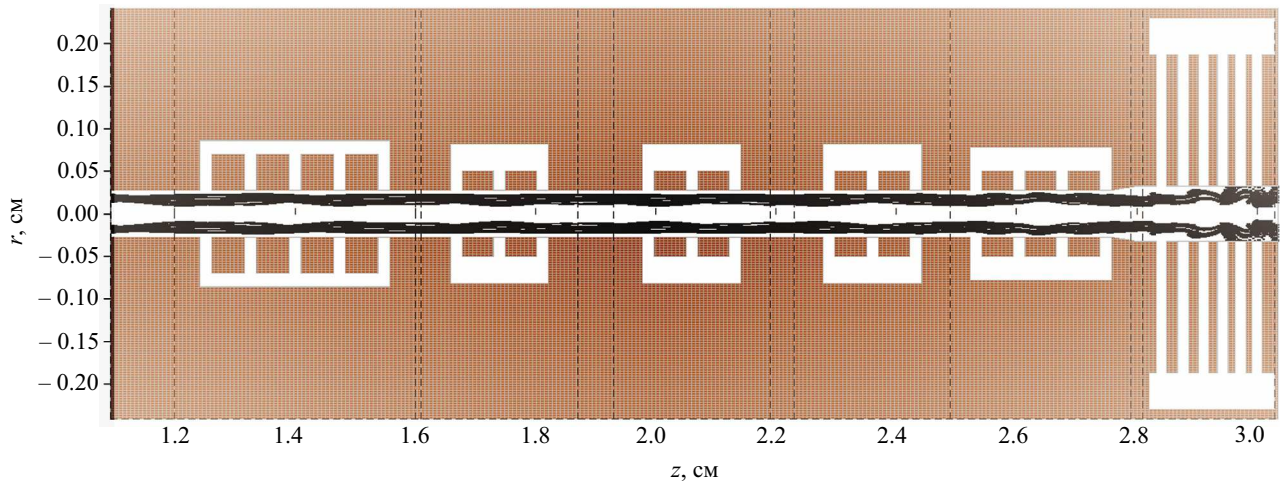


Рис. 4. Конструкция системы взаимодействия и мгновенный снимок положения крупных частиц

пучка разбивался на 704 крупные частицы. Разработанный КРВ имеет общую длину взаимодействия около 2 см, что составляет 40 электронных длин волн. С учетом того, что требовалось несколько десятков периодов для установления колебаний, при расчетах системы взаимодействия в целом приходилось анализировать динамику около 50 000 крупных частиц и учитывать влияние их пространственного заряда. Конструкция системы взаимодействия и мгновенный снимок положения крупных частиц приведены на рис. 4.

Пунктирные вертикальные линии соответствуют границам локализации электромагнитных полей различных резонаторов. Токпрохождение в динамическом режиме составило 94%. Как видно из рисунка, только небольшая часть электронов оседает на внутренние стенки системы в конце выходного резонатора, что является хорошим результатом для таких мощных приборов.

За счет начальной модуляции электронов по скорости входным ВЧ-сигналом в первом резонаторе происходит дальнейшая группировка электронов в сгустки, которая усиливается электромагнитными полями, возбуждаемыми пучком в промежуточных резонаторах, по мере прохождения электронов через систему взаимодействия. Продольные распределения первой и второй гармоник тока, возбуждаемых в электронном пучке при группировке, а также мощности электронов, переносимой в виде кинетической энергии, приведены на рис. 5, а. Мгновенный снимок распределения продольной компоненты импульсов крупных частиц в системе взаимодействия представлен на рис. 5, б.

Модулированные по скорости и сгруппированные в сгустки электроны, попадая в выходную систему

и взаимодействуя с электромагнитным полем резонатора преимущественно в тормозящей фазе, отдают часть своей энергии электромагнитному полю, которая далее выводится в нагрузку через выходной тракт КРВ. За счет выбора переменного шага электродинамической структуры выходного резонатора удалось реализовать синхронное взаимодействие сгруппированных в сгустки электронов с электромагнитными полями выходной системы. Электроны в сгустках, проходя через выходной резонатор, попадают в зазорах в тормозящую фазу его электрического поля и постепенно теряют свою энергию.

В начальной конструкции выходного резонатора диаметр пролетного канала был выбран таким же, как и во всем приборе, и равнялся 0.56 мм. Однако, как показали расчеты, динамическая расфокусировка электронного потока в такой выходной системе приводит к значительному токооседанию электронов на внутренних элементах выходного резонатора, что может вызвать их перегрев и выход прибора из строя. В итоговой конструкции выходного резонатора диаметр пролетного канала был увеличен с 0.56 мм до 0.64 мм. Это позволило снизить токооседание с 23% до 6%, что является приемлемой величиной для мощных приборов.

Как видно из анализа рис. 5, а, электроны теряют свою кинетическую энергию не только в выходном резонаторе. На влете в выходной резонатор они уже имеют мощность, заключенную в кинетической энергии электронов, составляющую только 94% от первоначальной мощности пучка $P_0 = I_0 V_0$. При этом около 2% от P_0 перешло в потенциальную энергию сгруппированного сгустка, а оставшаяся часть мощности 4% от P_0 была потеряна в стенках

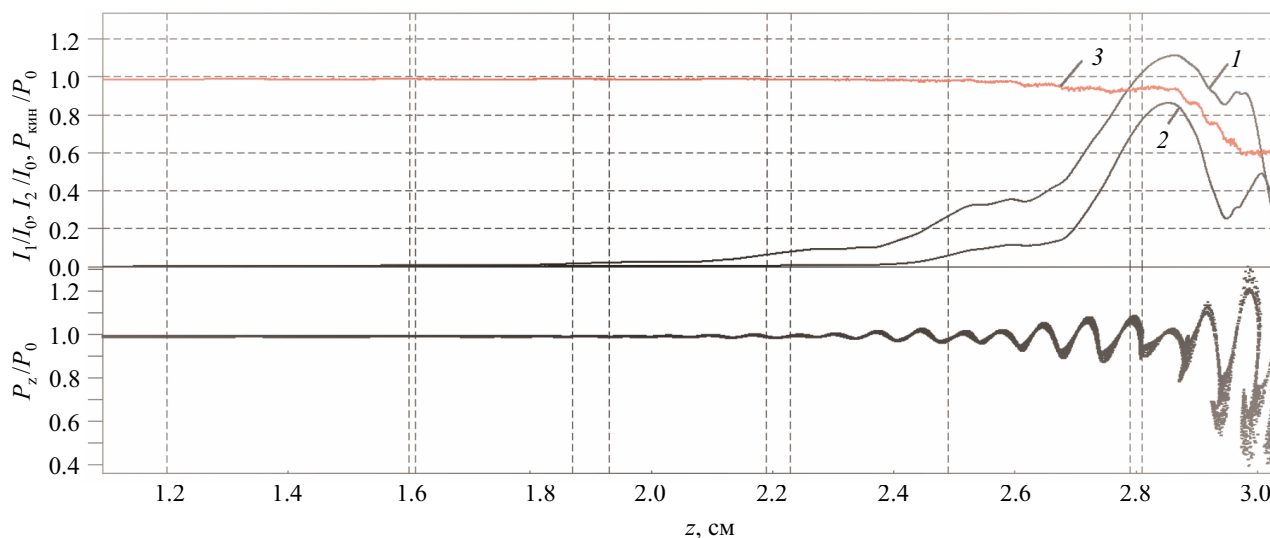


Рис. 5. а — Продольные распределения амплитуд первой (1) и второй (2) гармоник тока, а также мощности электронов, переносимой в виде кинетической энергии (3); б — мгновенный снимок продольной компоненты импульса крупных частиц в системе взаимодействия КРВ

промежуточных резонаторов и выделилась в виде тепла. На выходе из последнего резонатора электроны имеют суммарную мощность 61% от P_0 , часть из которой (1% от P_0) заключена в потенциальной энергии, а оставшаяся доля (60% P_0) — в кинетической. При этом 6% электронов оседают на стенках выходного резонатора, выделяя в виде тепла мощность 2.5% от P_0 . Таким образом, электронный КПД прибора $\eta_{эл}$, определяемый по разности суммарных энергий электронов во входном и выходном сечениях выходного резонатора, составил 32.5% на основной частоте. Токпрохождение в динамическом режиме составило 94%.

В настоящей работе не проводились исследования выходного СВЧ-тракта разработанного клистрона. По данным работ [3, 4], в W-диапазоне КПД выходного тракта КРВ может составлять от 70% до 80%. Полагая значение КПД выходной системы равным 80%, можно ожидать, что выходная СВЧ-мощность разработанного клистрона находится на уровне 8.6 кВт, а полный КПД равен 26%.

Полученное значение выходной мощности является рекордным для компактных КРВ W-диапазона. Один из главных факторов, позволивших добиться этого результата, — использование кольцевого электронного потока. Во-первых, экранирующее действие труб дрейфа сильнее ослабляет поле пространственного заряда электронов в таком пучке, чем в случае сплошного электронного потока. Это приводит к тому, что кольцевые потоки имеют меньшее значение параметра пространственного заряда, а следовательно, и лучшую эффективность группирования [18]. Во-вторых, в кольцевых пучках в меньшей степени проявляются эффекты расслоения, вызванные пространственным зарядом пучка. В-третьих, в таких пучках меньше провисание потенциала и доля энергии, переходящей в потенциальную энергию электронов, а следовательно, и выше КПД. Это позволяет при заданных ускоряющем напряжении и внешнем радиусе пучка обеспечить с помощью кольцевого электронного потока тот же уровень эффективности

группирования, что и для сплошного потока, но при этом использовать пучок большей мощности. Так, сравнительные оценки параметра пространственного заряда (1) для сплошного и кольцевого пучков для выбранных параметров электронного потока (табл. 1) показывают, что выигрыш в величине силы тока, а следовательно, и выходной мощности для кольцевого потока составляет 40% по сравнению со сплошным электронным пучком.

Для повышения полного КПД прибора в коллекторе разработанного клистрона используется также двухступенчатая рекуперация энергии [19, 20] с эффективностью рекуперации 54% в динамическом режиме. Таким образом, полный КПД разработанного КРВ составляет 40%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований разработана конструкция шестирезонаторной системы взаимодействия мощного клистрона с распределенным взаимодействием, обеспечивающая выходную мощность на уровне 8.6 кВт с электронным КПД 32.5%, коэффициентом усиления 56 дБ и полным КПД 40% за счет использования двухступенчатой рекуперации в коллекторе. По совокупности данных параметров разработанный КРВ превосходит существующие компактные клистроны в W-диапазоне. Данного результата удалось добиться за счет оптимального выбора исходных параметров электронного пучка, конструкции группирователя, коллектора с рекуперацией и электродинамических систем прибора. Одним из главных факторов увеличения мощности послужило использование более плотного кольцевого электронного потока. Однако такой путь также имеет ограничения, связанные с укорочением последней трубы дрейфа при увеличении силы тока пучка. Короткие трубы дрейфа не позволяют увеличивать количество зазоров выходной системы для распределения взаимодействия и ограничивают величину используемого ускоряющего напряжения, эффективность отбора энергии и выходную мощность.

Более высокие значения выходной мощности и КПД можно получить, используя планарные электродинамические системы. Для этого необходимо проведение тщательных теоретических исследований с помощью трехмерных программ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Booskee J.H.* // *Physics of Plasma*. 2008. **15**. 055502-1.
2. *Srivastava A.* // *European Journal of Advances in Engineering and Technology*. 2015. N 8. P. 54.
3. *Steer B.* et al. *Extended Interaction Klystron Technology at Millimeter and Sub-Millimeter Wavelength* // *IBID 2009 — IEEE National Radar Conference Proceedings*, January 2009.
4. *Pasour J.* et al. // *IEEE Tran. on ED*. 2014. **61**, N 6. P. 1630.
5. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // *Изв. РАН, сер. физ.* 2021. **85**, № 1. С. 106.
6. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // *Журнал радиоэлектроники*. 2019. № 6. С. 21.
7. *Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E.* et al. *Animation of Nonlinear Electron-Wave Interaction in Klystrons* // *KEK report 1/1997*. P. 185.
8. *Fukuda S.* et al. *Development of a High-Power VHF Klystron for JHF* // *APAC'98*, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 1998.
9. *Ding Y., Xiao X., Rodyakin V.E., Sandalov A.N.* *Theoretical and experimental investigations of the high power MBK, based on 2.5 D Arsenal — MSU Computer Code* // *Proc. of the 2nd ICMMWT*, Beijing, China, September 2000. P. 299.
10. *Shen B., Ding Y., Sandalov A.N.* et al. *Computer simulation of 100KW L-band CW broadband multi-beam klystron* // *IVESC2004*, Beijing, China, 2004. P. 312.
11. *Shen B., Ding Y., Zhang Z.* et al. // *IEEE Tr. on Electron Devices*. 2014. **61**, N 6. P. 1848.
12. *Ding H., Ding Y., Sun X.* et al. *Design of X-band 80kW CW broadband klystron* // *IVEC 2015*. P. 1.
13. *Qu Z., Ding Y., Wang S.* *Electronic optics system of a W-band 100-W Extended Interaction Oscillator* // *UCMMT 2016, Qingdao, China, 5–7 Sept. 2016*. P. 225.
14. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // *Журнал радиоэлектроники*. 2020. № 6. С. 19.
15. *Chernin D.* et al. *Extended Interaction Klystrons for terahertz power amplifiers* // *IEEE International Conference on Plasma Science*, Norfolk, VA, July 2010. P. 1.
16. *Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E.* *Power extraction in relativistic klystron amplifier* // *SPIE proc.* 1995. **2557**. P. 434.
17. *Rodyakin V.E., Bogolyubov A.N., Pikunov V.M., Svetkin M.I.* *Effects of Cavities RF Field Radial Non-Uniformity on Multiple-Beam Klystron Efficiency* // *PIERS 2017*, St Petersburg, Russia, 22–25 May 2017. P. 2734.
18. *Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н.* // *Журнал радиоэлектроники*. 2020. № 12. С. 33.
19. *Сандалов А.Н., Родякин В.Е.* // *Зарубежная радиоэлектроника*. 1984. № 9. С.63.
20. *Лопухин В.М., Родякин В.Е., Сандалов А.Н.* // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1985. № 10. С. 1.

A High Power W-Band Extended Interaction Klystron with a Hollow Electron Beam

V. E. Rodyakin^{1,a}, V. M. Pikunov^{1,b}, V. N. Aksenov^{2,c}

¹*Institute on Laser and Information Technologies — Branch of the Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» RAS. Shatura 140700, Russia.*

²*Physics Department and International Laser Center Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^avrodyakin@mail.ru, ^bvmpikunov@mail.ru, ^cv.aks@mail.ru.

The results of a theoretical study of a high power W-band extended interaction klystron with a hollow electron beam are presented. Numerical studies were carried out using the PARS computer code, taking into account the thermal spread of electron velocities at the cathode. As a result of the research and optimization of the parameters, the design of the electron-optical system and the interaction system of the 6-cavity klystron was developed, which provides a record output power of 8.6 kW for a given frequency with a gain of 56 dB, an electronic efficiency of 32% and a full efficiency of 26%. Using the developed two-stage depressed collector with a recovery efficiency of 54% in dynamic mode, it is possible to provide the full efficiency of the device at the level of 40%. The results of numerical calculations of the dynamics of electrons and their interaction with electromagnetic fields from the cathode to the collector in the quasi-three-dimensional approximation are presented.

Keywords: hollow electron beams, electron gun, multi-gap cavities, PARS computer code, extended interaction klystron, vacuum devices, space charge, depressed collector.

PACS: 41.75.Fr, 85.45.Bz, 84.40.-x.

Received 02 November 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. **76**, No. 2. Pp. 89–96

Сведения об авторах

1. Родякин Владимир Евгеньевич — науч. сотрудник; e-mail: vrodyakin@mail.ru.
2. Пикунов Виктор Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: vmpikunov@mail.ru.
3. Аксенов Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: v.aks@mail.ru.