

DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.4

УДК 621.385.624

## СИСТЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО КЛИСТРОНА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В. Е. Родякин<sup>1</sup>, В. М. Пикунов<sup>1</sup>, В. Н. Аксенов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН - филиал  
Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский  
центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»,  
140700, Московская область, г. Шатура, Святоозерская, 1

<sup>2</sup> Физический факультет и международный Лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1

Статья поступила в редакцию 23 мая 2020 г.

**Аннотация.** Представлены результаты теоретического исследования системы взаимодействия мощного многорезонаторного клистрона с распределенным взаимодействием на частоту 95 ГГц. Численные исследования проводились с использованием программного комплекса PARS. В результате исследований и оптимизации параметров была разработана конструкция системы взаимодействия семи-резонаторного КРВ, обеспечивающая выходную мощность около 7 кВт с коэффициентом усиления 50 дБ и электронным КПД 32%. С использованием разработанного двухступенчатого коллектора с пониженным потенциалом с эффективностью рекуперации 63% в динамическом режиме возможно обеспечить полный КПД прибора на уровне 43%.

**Ключевые слова:** электронный пучок, клистрон с распределенным взаимодействием, многоззорный резонатор, коллектор с пониженным потенциалом, комплекс программ «PARS», фокусирующее магнитное поле.

**Abstract.** We present the results of theoretical analysis of interaction region of the high power W-band extended interaction klystron. The computer code PARS is used for numerical simulation. As result of optimization, the design of extended interaction klystron with 7 multigap cavities has been developed. The klystron provides output

power about 7 kW with 50 dB gain, 32% electronic efficiency and 43% total efficiency with depressed collector. Developed double-stage depressed collector shows beam energy recovery efficiency 63% in dynamic regime with taking into account of secondary electron emission from collector's walls.

**Key words:** computer code PARS, electron beam, multi-gap cavity, extended interaction klystron, depressed collector, focusing magnetic field, electronic efficiency, electron bunch.

## Введение

Бурно растущие потребности в компактных мощных источниках СВЧ излучения вызвали в последние годы активное продвижение традиционной техники электровакуумных приборов в терагерцовый диапазон. Среди них наиболее перспективными являются 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  $1 \text{ кА/см}^2$ ) [1], а также распределенных потоков (многолучевых 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% [2]. Общий КПД прибора был увеличен до 32% за счет одноступенчатой рекуперации в коллекторе. В клистроне использовался 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 СРІ 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% [3]. Общий КПД разработанного КРВ составил 17.2% за счет использования одноступенчатой рекуперации энергии в коллекторе с пониженным потенциалом. Однако возникновение диокотронной неустойчивости в таких пучках, приводящей к их разрушению, ограничивает величину силы тока ленточного электронного потока, который можно использовать в КРВ W-диапазона.

Однако, по нашему мнению, возможности применения традиционных аксиально-симметричных цилиндрических электронных пучков в КРВ W-диапазона еще не исчерпаны. В работе [4] была представлена конструкция магнитно-экранированной высокопервианской электронной пушки с коэффициентом компрессии, равным 100, обеспечивающая формирование и 99% токопрохождение плотного цилиндрического электронного пучка (до 1.4 кА/см<sup>2</sup>) с силой тока 1.8 А и ускоряющим напряжением 15 кВ через систему взаимодействия мощного КРВ миллиметрового диапазона в статическом режиме (без СВЧ сигнала). 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.

При анализе и оптимизации всех узлов прибора использовался программный комплекс «PARS», разработанный авторами [5] на основе модернизации программы «Арсенал-МГУ», зарекомендовавшей себя в нашей стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки и исследований многочисленных клистронных усилителей. Выбранные в результате проведенного в работе [4] рассмотрения параметры электронного пучка и магнитного поля для разработанного КРВ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные параметры КРВ

Параметр		Значение	Ед. измерения
Рабочая частота	$f_o$	95	ГГц
Ускоряющее напряжение	$V_o$	15	кВ
Сила тока	$I_o$	1.8	А
Радиус трубы	$R_T$	0.25	мм
Радиус пучка	$R_n$	0.20	мм
Фокусирующее магнитное поле	$B_\phi$	0.9	Тл

## 1. Оценка электродинамических параметров резонаторов КРВ

При выборе конфигурации электродинамических систем КРВ в W-диапазоне необходимо учитывать особенности технологии изготовления элементов конструкции резонаторных структур, связанные с их малыми размерами. Перспективными с этой точки зрения являются планарные электродинамические структуры лестничного типа [6]. 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 из технологических соображений вместо традиционных тороидальных резонаторов были использованы цилиндрические резонаторы, которые легче изготовить. Ширина зазоров всех резонаторов была выбрана равной 0,2 мм, что соответствует фазовому углу пролета зазора  $\theta_d=96^\circ$ . Это значение является компромиссным между обеспечением эффективности взаимодействия, технологичностью изготовления и опасностью ВЧ пробоя. Использование одно-зазорных 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 одно-зазорные резонаторы в качестве

промежуточных, является опасность вакуумного пробоя. В предпоследних резонаторах относительная амплитуда напряжений на зазорах резонатора может достигать значений 0.2...0.4, что приводит к высоким значениям напряженности электрических полей в зазоре резонатора. Расчеты по программе PARS показали, что для одно-зазорного цилиндрического резонатора максимальная напряженность электрического поля возникает на краях зазора и более, чем в 2 раза превышает среднее напряжение в зазоре. При возбуждении в таком резонаторе относительного напряжения 0.4, на краях зазора будет возникать напряженность электрического поля, равная 680 кВ/см, что создает повышенную опасность вакуумного пробоя.

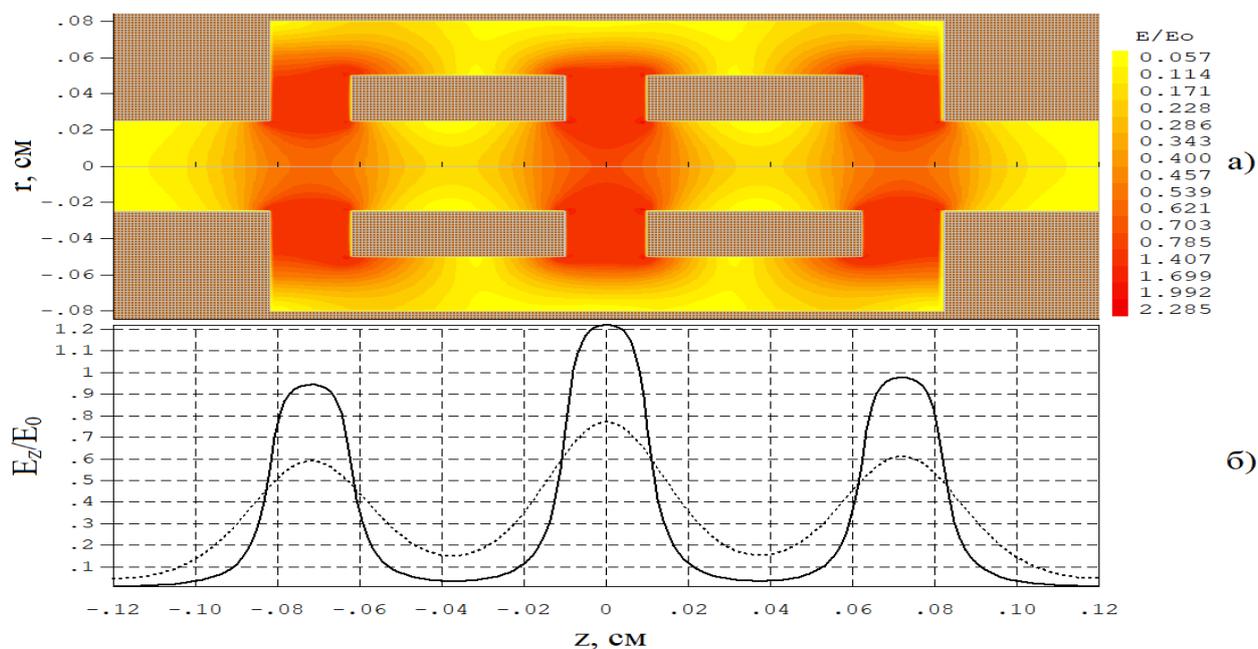


Рис. 1. Конструкция трех-зазорного резонатора и распределение электрических полей основного вида колебаний (а). Распределение продольной составляющей электрического поля на оси резонатора (пунктирная кривая) и на радиусе пучка (сплошная кривая).

По этим причинам в разработанном КРВ в качестве промежуточных резонаторов после серии проведенных исследований и расчетов были выбраны двух-зазорные и трех-зазорные цилиндрические резонаторы. На рис.1а представлена конструкция и распределение электрического поля основного вида колебаний трех-зазорного резонатора. В реальной конструкции должны

присутствовать дополнительные вставки, удерживающие внутренние трубки резонаторов. Эти вставки не учитывались при расчетах. 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 [7,8]. Рассчитанные продольные распределения аксиальной компоненты электрического поля основного вида колебаний на оси пролетного канала (пунктирная кривая) и на радиусе электронного пучка (сплошная кривая) приведены на рис.1б. Как видно из рисунка, основным видом колебаний данного резонатора является  $2\pi$ -вид. Амплитуда полей на оси резонатора заметно слабее, чем на радиусе пучка, что является следствием компромиссного выбора более широкого пролетного канала, чем необходимо для эффективного взаимодействия электронного пучка с электромагнитными полями резонатора. Однако это позволяет повысить ток электронного пучка и получить более высокую выходную мощность даже при снижении КПД, чем в случае меньшего диаметра канала.

Данный трех-зазорный резонатор, по сравнению с одно-зазорным, имеет в два раза большее значение собственной добротности ( $Q=1300$ ) и в 3.5 раза большее значение волнового сопротивления ( $\rho=73$ ). Кроме того, поскольку возбуждаемое в резонаторе напряжение распределяется между тремя зазорами, данная конструкция обеспечивает при относительном напряжении 0.4 максимальную амплитуду электрического поля 228 кВ/см, что является приемлемым значением с точки зрения опасности вакуумного пробоя при импульсном режиме работы прибора.

Для обеспечения эффективной модуляции в качестве входного резонатора была выбрана пяти-зазорная конструкция, изображенная на рис.2а. На этом же рисунке приведены рассчитанные параметры системы и структура электрических полей основного вида колебаний.

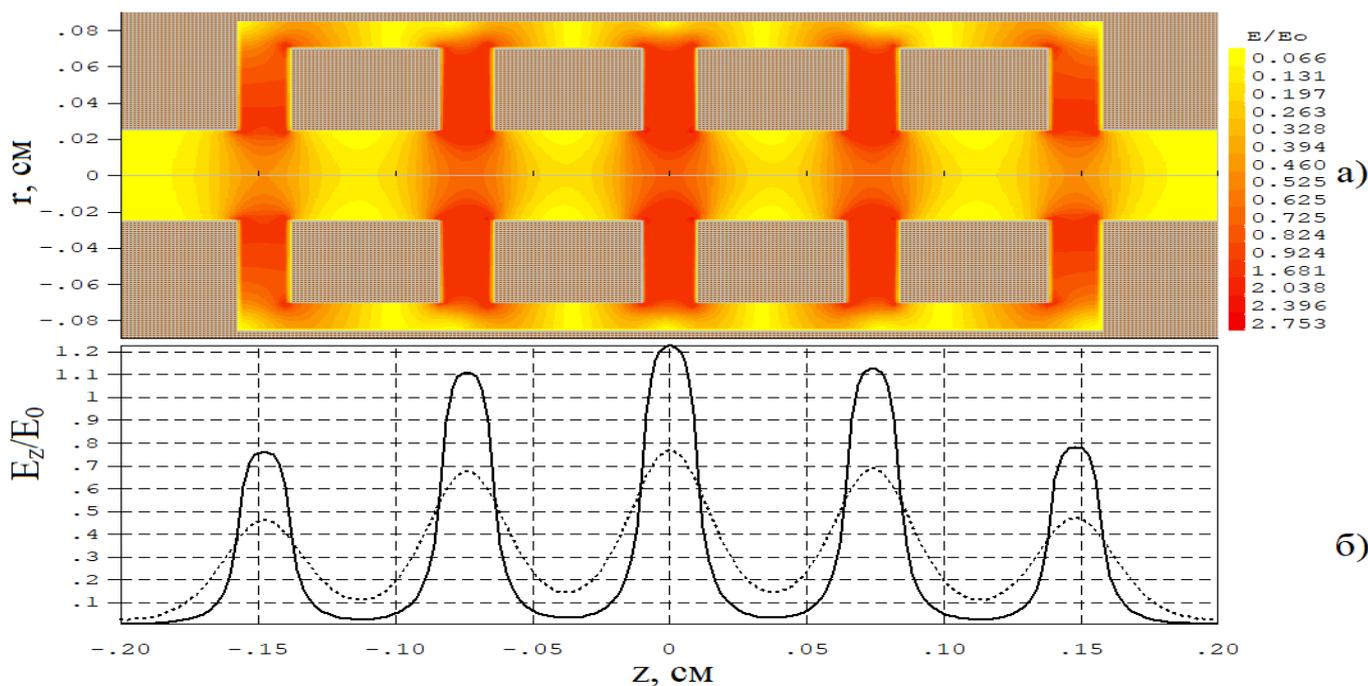


Рис. 2. Конструкция пяти-зазорного входного резонатора и распределение электрических полей основного вида колебаний (а). Распределение продольной составляющей электрического поля на оси резонатора (пунктирная кривая) и на радиусе пучка (сплошная кривая).

Волновое сопротивление данного резонатора составляет 96 Ом. Рассчитанные продольные распределения аксиальной компоненты электрического поля основного вида колебаний на оси пролетного канала (пунктирная кривая) и на радиусе электронного пучка (сплошная кривая) для входного резонатора приведены на рис.2б. Как и для трех-зазорного резонатора основным видом колебаний данной электродинамической структуры является  $2\pi$ -вид, имеющий частоту 95 ГГц. Собственная добротность входного резонатора на этом виде колебаний составила  $Q=880$ . Частота следующей моды резонатора 107.7 ГГц располагается далеко от частоты основного вида колебаний. Расстояния между центрами зазоров были выбраны одинаковыми и равными электронной длине волны для синхронизации взаимодействия электронного потока и электромагнитных полей.

Для обеспечения эффективного отбора энергии в качестве выходного резонатора была выбрана шести-зазорная конструкция, изображенная на рис.3а. На этом же рисунке приведена структура электрических полей рабочего  $\pi$ -вида

колебаний, имеющего частоту 95 ГГц и собственную добротность 850. Выбор данного вида колебаний в качестве рабочего обусловлен ограничением со стороны длины последней трубы дрейфа между выходным и предвыходным резонаторами.

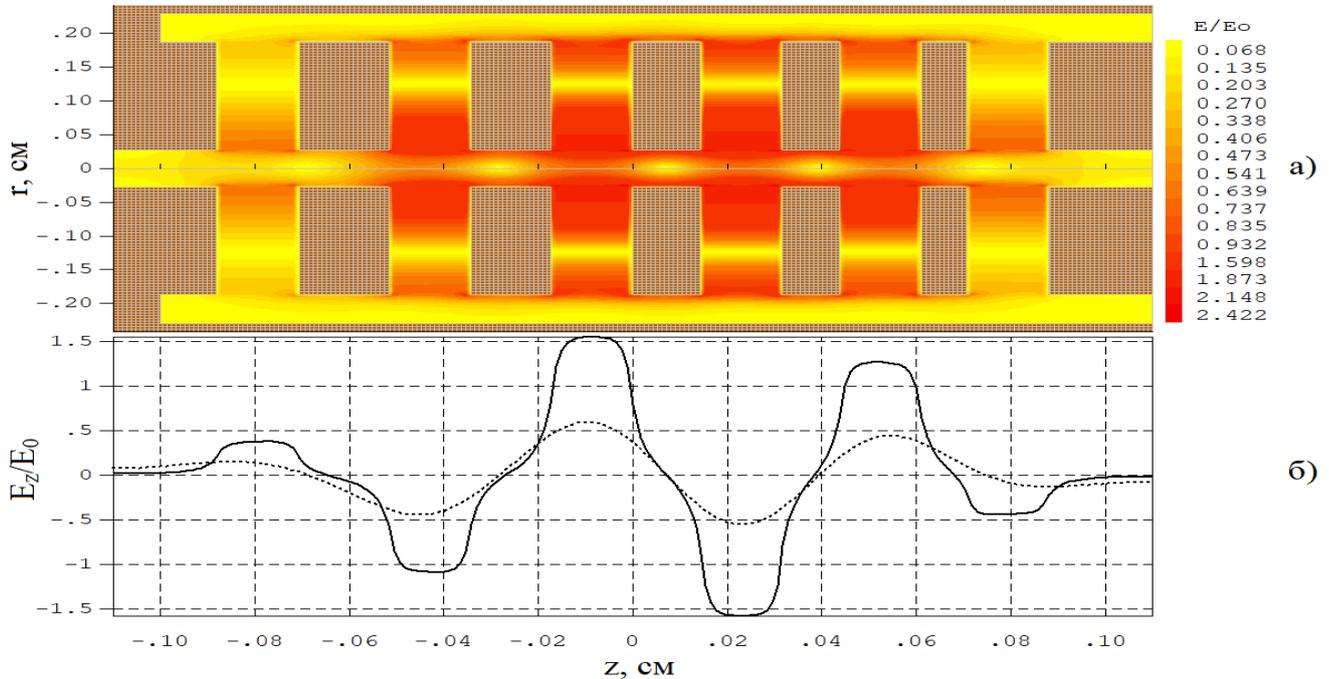


Рис. 3. Конструкция шести-зазорного выходного резонатора и распределение электрических полей рабочего  $\pi$ -вида колебаний (а). Распределение продольной составляющей электрического поля на оси резонатора (пунктирная кривая) и на радиусе пучка (сплошная кривая).

Проведенные с помощью программы PARS расчеты, а также предыдущий опыт авторов данной статьи в исследованиях и разработке клистронов показывают, что расстояние между центрами выходного и предпоследнего резонаторов  $L_{вых}$  в эффективных схемах группирователей клистронов не должна превышать величину 15% от редуцированной плазменной длины волны:

$$L_q = \frac{\gamma_0^{3/2}}{R_p \left( \frac{\omega_p}{\omega_0} \right)} L_e, \quad (1)$$

где  $L_e = 2\pi \frac{u_0}{\omega_0}$  - электронная длина волны,  $\gamma_0 = 1 + \frac{\eta_e V_0}{c^2}$  - релятивистский

фактор,  $u_0 = \frac{\sqrt{1 + \gamma_0}}{\gamma_0} \sqrt{\eta_e V_0}$  - скорость электронов немодулированного пучка, с

– скорость света в вакууме,  $R_p$  – коэффициент редукции плазменной частоты,

$\eta_e = \frac{e}{m_0}$  - отношение заряда  $e$  к массе покоя  $m_0$  отдельного электрона,

$\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $\omega_p = \frac{\eta_e \rho_0}{\varepsilon_0}$  - плазменная частота электронного потока,  $\rho_0$  – средняя

плотность заряда в электронном потоке,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная. Для выбранных исходных параметров КРВ (см. Табл.1)  $L_q=1.155$  см,  $L_e=0.075$  см. Минимальное значение  $L_{вых}$  для трех-зазорного предпоследнего и шести-зазорного выходного резонаторов для основного  $2\pi$  вида колебаний равно  $L_{вых}=4.5L_e=0.3375$  см, что составляет 29% от  $L_q$  и превышает минимально допустимое оптимальное значение почти в 2 раза. Для  $\pi$ -вида  $L_{вых}=2.25L_e=0.3375$  см и составляет 14.5%, что позволяет обеспечить эффективное группирование в предвыходном модуле КРВ.

Рассчитанное волновое сопротивление выходного резонатора на рабочем  $\pi$ -вида колебаний составляет 58 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. Рассчитанные продольные распределения аксиальной компоненты электрического поля рабочего вида колебаний на оси пролетного канала (пунктирная кривая) и на радиусе электронного пучка (сплошная кривая) для выходного резонатора приведены на рис.3б. Принимая во внимание, что сформированные группирователем сгустки электронов будут тормозиться в выходном резонаторе, 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. Высокая амплитуда электромагнитных полей, возбуждаемых в выходном

резонаторе, приводит к динамической расфокусировке электронного потока и может вызвать значительное токооседание электронов на внутренних элементах ее конструкции и даже вывести прибор из строя. Поэтому диаметр пролетного канала в выходном резонаторе был увеличен с 0.5 мм до 0.56 мм.

## 2. Система взаимодействия КРВ

Используя результаты 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 наивысшую выходную мощность при заданных исходных параметрах.

Таблица 2. Параметры системы взаимодействия разработанного КРВ

Резонаторы:	1	2	3	4	5	6	7
Собственная частота, ГГц	95.00 0	95.01 1	95.01 9	95.05 8	95.10 5	95.12 2	95.00 0
Нагруженная добротность	400	900	900	900	1000	800	400
Волновое сопротивление, Ом	90	49	49	49	75	40	58
Вид колебаний	2π	2π	2π	2π	2π	π	π
Количество зазоров	5	2	2	2	3	3	6

На входе в систему взаимодействия использовались данные расчета электронной пушки с учетом теплового разброса поперечных составляющих скоростей электронов на катоде с температурой  $T_k=1100\text{K}$  [4]. Рассчитанные структуры собственных полей резонаторов и их параметров, приведенные в разделе 1, использовались при моделировании взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями резонаторов. При численных расчетах каждый электронный период 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 тысяч крупных частиц и учитывать влияние их пространственного заряда.

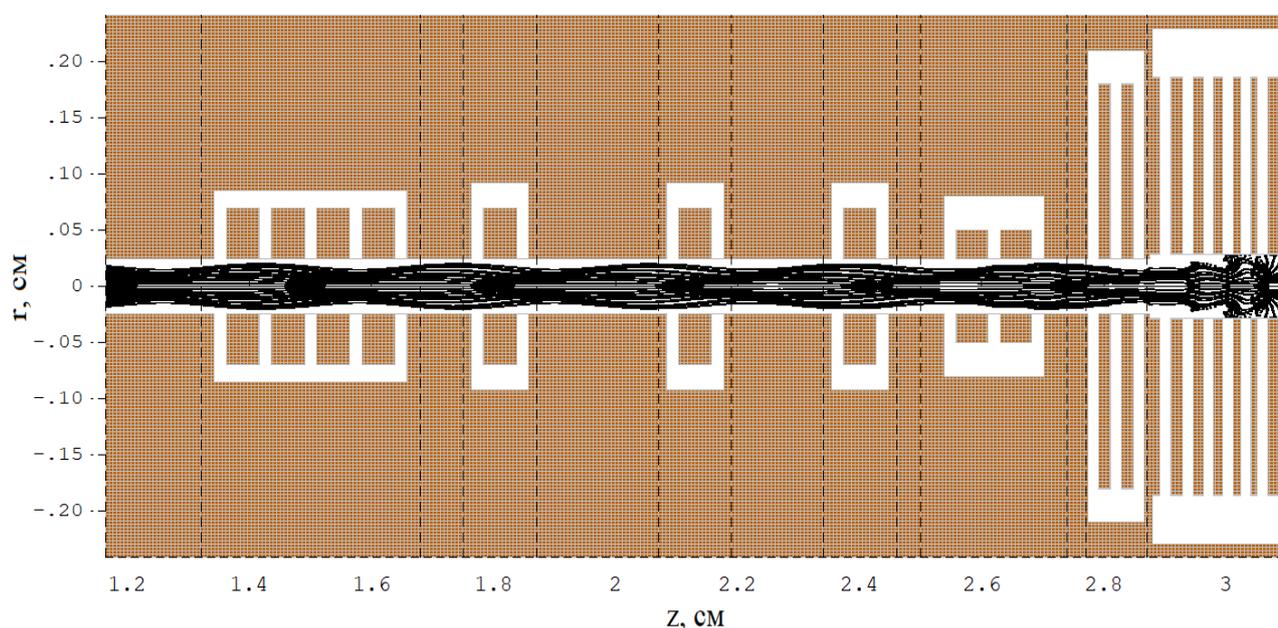


Рис. 4. Конструкция системы взаимодействия и мгновенный снимок положения крупных частиц.

Конструкция системы взаимодействия и мгновенный снимок положения крупных частиц приведены на рис.4. Разработанный КРВ имеет 7 резонаторов: 5-зазорный входной, три промежуточных 2-зазорных, два промежуточных 3-зазорных и 6-зазорный выходной. Пунктирные вертикальные линии соответствуют границам локализации электромагнитных полей различных резонаторов. Токопрохождение 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. Характер группировки иллюстрируется фазовой диаграммой электронов одного периода при их пролете через систему

взаимодействия (рис.5). Из рисунка видно, что в электронном потоке наблюдается заметное расслоение, вызванное как пространственным зарядом электронов, так и сильной радиальной зависимостью электромагнитных полей резонаторов (см. раздел 2).

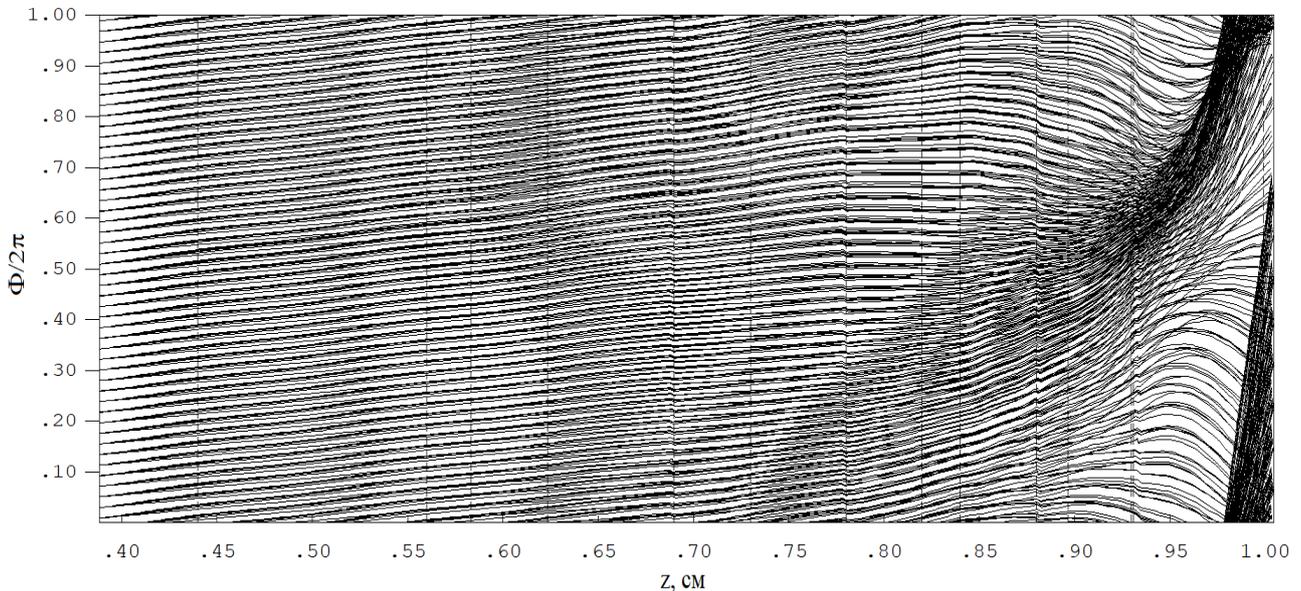


Рис. 5. Фазовая диаграмма группировки электронов в системе взаимодействия КРВ.

Это не позволяет добиться двугорбой формы сгруппированного электронного сгустка на периоде, характерной для группирователей высокоэффективных клистронов. Структура сгустка электронов во входном сечении последнего резонатора разработанного КРВ приведена на рис.6.

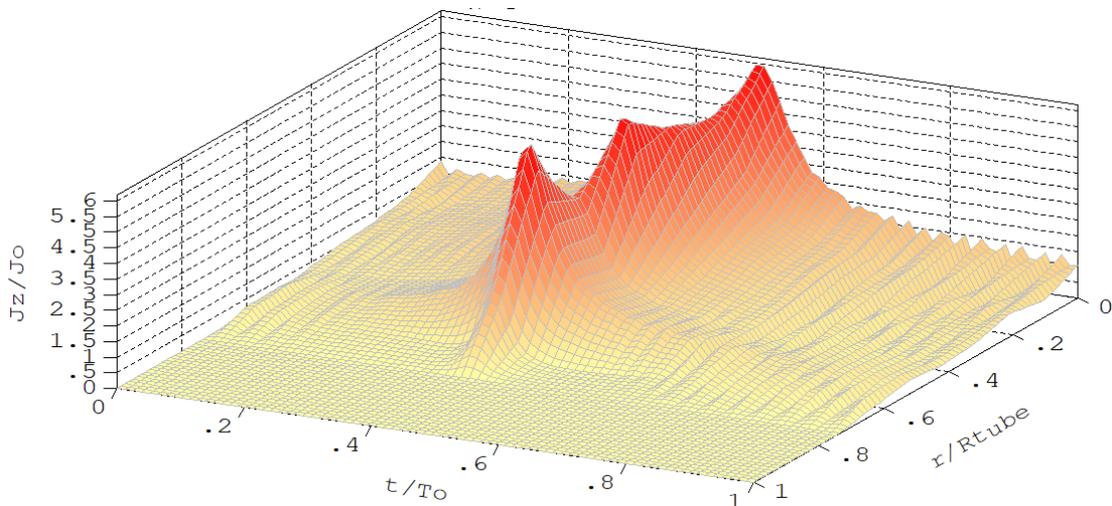


Рис. 6. Форма сгруппированного сгустка электронов на влете в выходной резонатор.

По вертикальной оси отложена продольная составляющая плотности тока, нормированная на величину плотности тока немодулированного электронного потока. По горизонтальным осям отложены нормированное время в течение одного СВЧ периода и радиальная координата, нормированная на радиус пролетного канала.

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.7а.

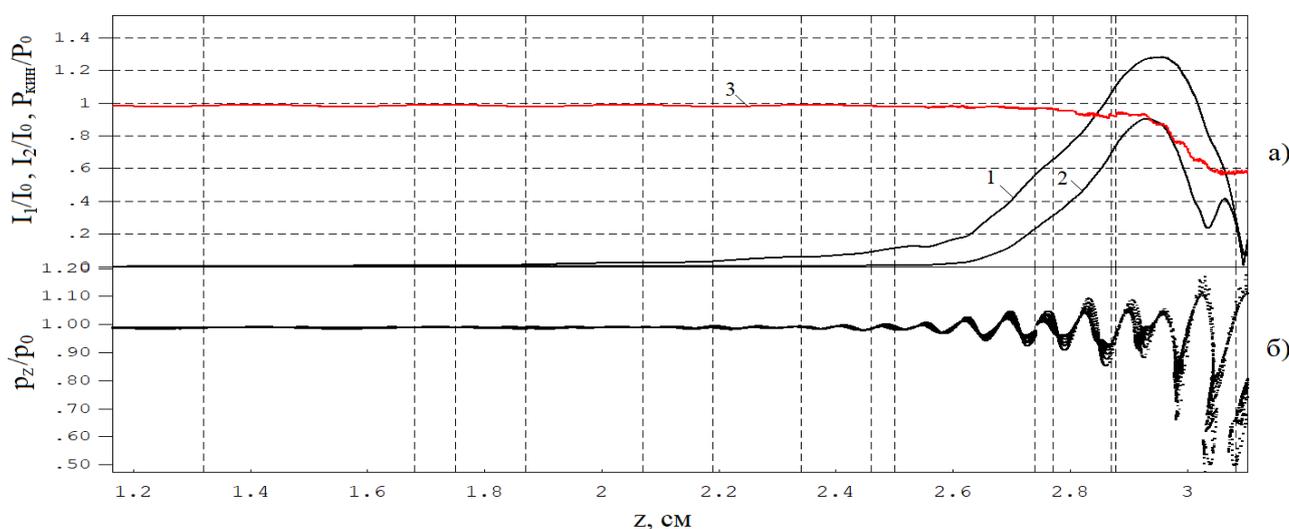


Рис. 7. а): Продольные распределения амплитуд первой (кривая 1) и второй (кривая 2) гармоник тока, а также мощности электронов, переносимой в виде кинетической энергии (кривая 3). б): Мгновенный снимок продольной компоненты импульса крупных частиц в системе взаимодействия КРВ.

Мгновенный снимок распределения продольной компоненты импульсов крупных частиц в системе взаимодействия представлен на рис.7б. 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 (рис.8). Электроны в сгустках, проходя через выходной резонатор, попадают в зазорах в тормозящую фазу его электрического поля (синий цвет полей резонатора на картине анимации) и постепенно теряют свою энергию.

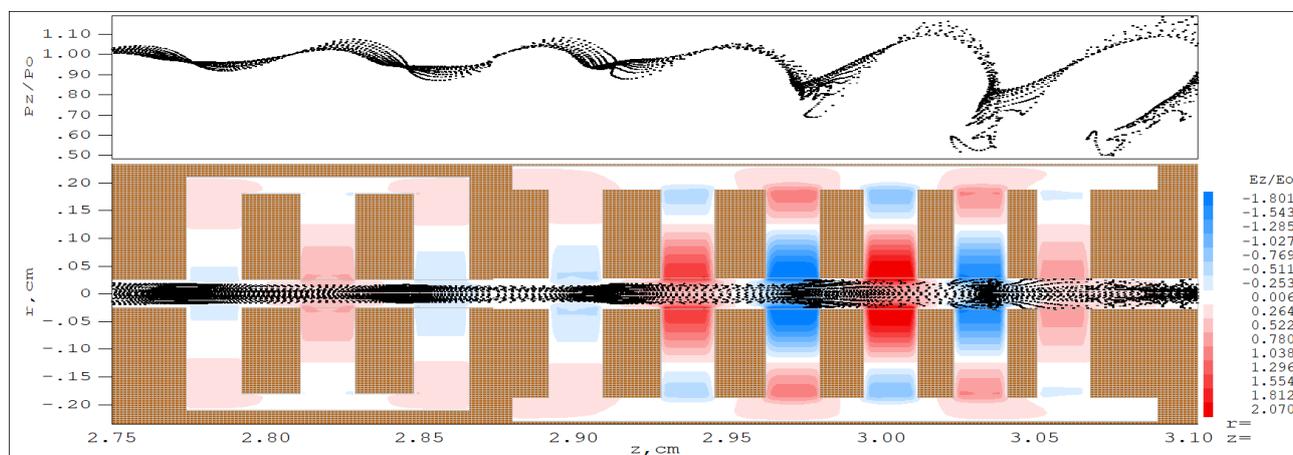


Рис. 8. Динамика крупных частиц, их продольной компоненты импульса, а также продольной компоненты электрического поля в предпоследнем и выходном резонаторах системы взаимодействия. Для просмотра анимации [кликните здесь](#).

Как видно из анализа рис.7а, электроны теряют свою кинетическую энергию не только в выходном резонаторе. На влете в выходной резонатор они уже имеют мощность, заключенную в кинетической энергии, составляющую только 91% от первоначальной мощности пучка  $P_o = I_o V_o$ . При этом 3.5% от  $P_o$  перешло в потенциальную энергию сгруппированного сгустка, а оставшаяся часть мощности 5.5% от  $P_o$  была потеряна в стенках промежуточных резонаторов и выделилась в виде тепла. На выходе из последнего резонатора электроны имеют суммарную мощность 61% от  $P_o$ , часть из которой (2% от  $P_o$ ) заключена в потенциальной энергии, а оставшаяся доля 59%  $P_o$  – в кинетической. 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.

Зависимость СВЧ мощности, отбираемой в выходном резонаторе КРВ, от входной на рабочей частоте приведена на рис.9а. Оптимизированный при исходных параметрах КРВ смог обеспечить СВЧ мощность, отбираемую от пучка на уровне 9 кВт на частоте 95 ГГц при электронном КПД 32.5% и

коэффициенте усиления 50 дБ. Частотная характеристика эффективности КРВ приведена на рис.9б. Естественная полоса усиления разработанного клистрона составила 0.1% по уровню 3 дБ.

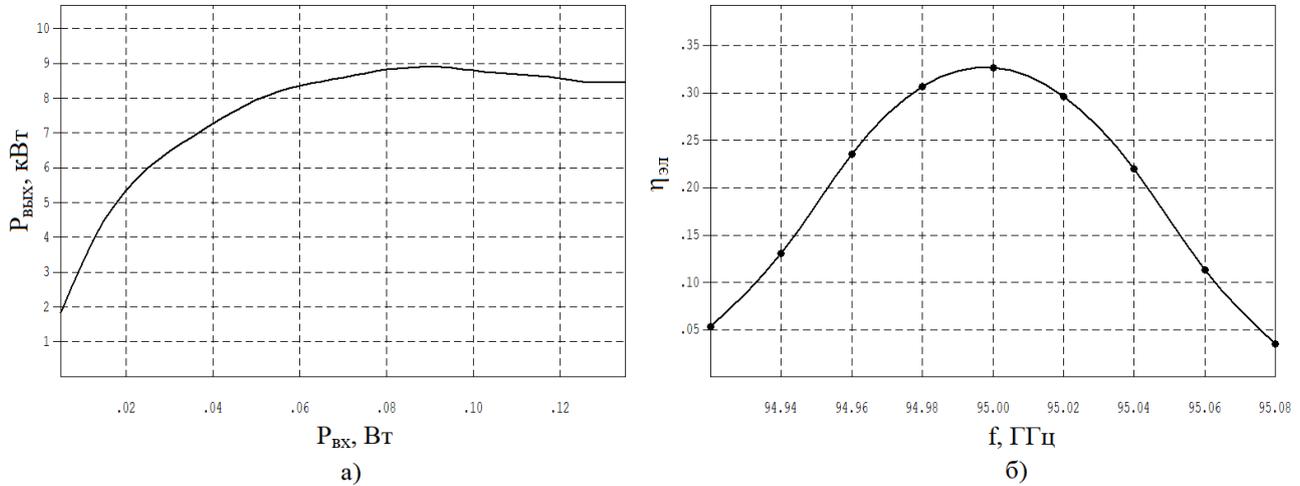


Рис. 9. Зависимость выходной мощности КРВ от мощности входного сигнала на основной частоте. (а). Частотная характеристика КПД КРВ при  $P_{вх}=0.9$  Вт.

В настоящей работе не проводились исследования выходного тракта разработанного клистрона. По данным работ [2,3] в W-диапазоне КПД выходного тракта КРВ может составлять от 70% до 80%. Полагая, что значение КПД выходной системы для разработанного КРВ составляет 80%, можно ожидать, что выходная мощность разработанного клистрона находится на уровне 7.2 кВт. Для повышения общего КПД в коллекторе разработанного клистрона используется двухступенчатая рекуперация энергии [4] с эффективностью рекуперации 63% в динамическом режиме. Таким образом, полный КПД разработанного КРВ составил 43%.

### Заключение

В результате исследований разработана конструкция семи-резонаторной системы взаимодействия мощного клистрона с распределенным взаимодействием, обеспечивающая выходную мощность на уровне 7 кВт с электронным КПД 32.5%, коэффициентом усиления 50 дБ и полным КПД 43% 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 электронного потока. Однако, как было показано в работе, 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.

### Литература

1. Srivastava A. Microfabricated Terahertz Vacuum Electron Devices: Technology, Capabilities and Performance Overview // European Journal of Advances in Engineering and Technology. 2015. Vol.2. No.8. P.54-64.
2. Steer B., Roitman A., Horoyski P., Hyttinen M., Dobbs R., Berry D. Advantages of extended interaction klystron technology at millimeter and sub-millimeter frequencies. // 16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007. Albuquerque, NM, USA. P. 1049 - 1053. DOI: [10.1109/PPPS.2007.4652369](https://doi.org/10.1109/PPPS.2007.4652369)
3. Pasour J. et.al. Demonstration of a Multikilowatt, Solenoidally Focused Sheet Beam Amplifier at 94 GHz. // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. Vol. 61. No.6. P.1630.

4. Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н. Электронно-оптическая система мощного клистрона с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/3/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.3
5. Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н. Комплекс программ для численного анализа электровакуумных приборов клистронного типа // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/4/text.pdf> DOI: [10.30898/1684-1719.2019.6.4](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.6.4)
6. Booske J.H. Plasma physics and related challenges of millimeterwave-to-terahertz and high power microwave generation // Phys. Plasmas. 2008. Vol. 15. No.5. P.055502–055516.
7. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. Power extraction in relativistic klystron amplifier // SPIE proc. 1995. Vol. 2557. P.434-442. URL: [https://www.researchgate.net/publication/253153010\\_Power\\_extraction\\_in\\_relativistic\\_klystron\\_amplifier](https://www.researchgate.net/publication/253153010_Power_extraction_in_relativistic_klystron_amplifier)
8. 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.2734-2737. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8262217>

**Для цитирования:**

Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н. Система взаимодействия мощного клистрона с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/4/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.4