

DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.3

УДК 621.385.624

## ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА 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 электронно-оптической системы мощного многорезонаторного клистрона с распределенным взаимодействием (КРВ) на частоту 95 ГГц. Численные исследования проводились с использованием программного комплекса PARS. В результате исследований и оптимизации параметров была разработана конструкция электронно-оптической системы клистрона, обеспечивающая формирование плотного трубчатого электронного потока силой тока 1.8 А, его дальнейшую транспортировку через систему взаимодействия прибора с коэффициентом токопрохождения 99% с учетом теплового разброса скоростей электронов на катоде и торможение в двухступенчатом коллекторе с пониженным потенциалом с эффективностью рекуперации 73% в статическом режиме с учетом вторичных электронов.

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

**Abstract.** We present the results of theoretical analysis of electron optical system 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 Piers type

electron gun, magnetic focusing system and depressed collector have been developed. Electron gun has high beam current density convergence factor 100 and gives electron beam current 1.8 A. Magnetic focusing system provides 99% beam current transmission through klystron interaction region with taking into account of thermal distributions of transverse energy of emitted electrons. Double-stage depressed collector shows beam energy recovery efficiency 72% in static regime with taking into account of secondary electron emission from collector's walls.

**Key words:** computer code PARS, electron beam, electron gun, depressed klystron, collector, focusing magnetic field, beam optics, secondary electron emission.

## Введение

Источники миллиметрового излучения находят все более широкое применение в научных, гражданских и военных областях. Однако применение миллиметрового излучения для решения научных и прикладных задач ограничивается нехваткой мощности генераторов и усилителей этого диапазона частот. 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 КРВ.

Неизбежное уменьшение размеров замедляющих структур ЛБВ и резонаторов КРВ миллиметрового диапазона приводит к уменьшению эффективности взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями электродинамических систем этих СВЧ приборов. Требование компактности приборов также ограничивает величину используемого ускоряющего напряжения  $V_0$  (обычно менее 20 кВ [1]). Поэтому разработчикам приходится повышать мощность электронных потоков в основном за счет увеличения их силы тока. Из-за малых размеров сечения пролетного канала в миллиметровом диапазоне для увеличения силы тока приходится переходить к использованию электронных потоков с высокими значениями плотности тока в пучке (более 1 кА/см<sup>2</sup>) [2], а также распределенных потоков (многолучевых и

ленточных электронных пучков). Для этого требуется тщательная разработка конструкции электронных пушек с высокой компрессией, а также магнитной фокусирующей системы, обеспечивающей транспортировку плотных электронных потоков через систему взаимодействия прибора. Кроме того, из-за невысокой эффективности приборов в миллиметровом диапазоне и необходимости рассеяния высокой остаточной мощности отработанного электронного пучка, почти обязательным является применение в приборах коллекторов с рекуперацией энергии. По этим причинам разработка электронно-оптических систем для формирования, транспортировки и рекуперации энергии интенсивных электронных потоков является отдельной и весьма сложной задачей, которую необходимо решать при конструировании приборов вакуумной микроэлектроники. В конечном итоге мощность и качество сформированного электронно-оптической системой электронного потока во многом определяют выходные характеристики КРВ в миллиметровом диапазоне.

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 на частоту 94 ГГц с выходной импульсной мощностью 7.5 кВт и электронным КПД 8.6% [3]. Ленточный электронный пучок  $5.5 \times 0.4$  мм<sup>2</sup> силой тока 3.6 А и ускоряющим напряжением 19.5 кВ фокусируется магнитным полем соленоида 0.86 Тл. Общий КПД разработанного КРВ составил 17.2% за счет использования одноступенчатой рекуперации энергии в коллекторе с пониженным потенциалом (-11 кВ).

Однако основной проблемой при транспортировке плотных ленточных электронных потоков является возникновение диокотронной неустойчивости, которая проявляется под воздействием сил магнитного поля и пространственного заряда и приводит к их разрушению. Это ограничивает

величину силы тока ленточного электронного потока, который можно использовать в КРВ W-диапазона. Кроме того, транспортировка ленточных пучков связана со значительным усложнением магнитной фокусирующей системы.

Институт электроники китайской академии наук (IECAS) также проводит многочисленные исследования в области разработки КРВ W-диапазона с использованием, как ленточных электронных пучков, так и многолучевых схем [4,5]. Однако использование многолучевых конструкций в КРВ W-диапазона тоже имеет свои ограничения по силе тока. Малые поперечные размеры электродинамических систем КРВ в этом диапазоне позволяют использовать всего несколько лучей с небольшой компрессией в электронной пушке.

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% [6]. Общий КПД прибора был увеличен до 32% за счет одноступенчатой рекуперации в коллекторе. В приборе использовался аксиально-симметричный цилиндрический электронный пучок силой тока 0.574 А, ускоряющим напряжением 16.3 кВ.

В России также прорабатываются возможности создания КРВ W-диапазона [7,8].

По нашему мнению возможности применения традиционных аксиально-симметричных цилиндрических электронных пучков в КРВ W-диапазона еще не исчерпаны. В данной работе проведены теоретические исследования возможности разработки электронно-оптической системы с цилиндрическим электронным пучком для мощного КРВ на частоту 95 ГГц, который бы смог по совокупности параметров 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 [9] на основе модернизации программы «Арсенал-МГУ», зарекомендовавшей себя в нашей

стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки и исследований многочисленных клистронных усилителей [10-14].

В качестве ускоряющего было выбрано напряжение 15 кВ для предотвращения пробоев в резонаторах и элементах электронно-оптической системы прибора. Радиус пролетного канала, соответствующий заданным параметрам, был выбран равным 0,25 мм. Это значение соответствует условиям компромисса между величиной силы тока и эффективностью КРВ. Для фокусировки было выбрано магнитное поле с максимальной индукцией 0.9 Тл. Исходя из этих условий, была определена величина силы тока электронного пучка, которая составила 1.8 А. Выбранные в результате проведенного рассмотрения параметры электронного пучка и магнитного поля (табл. 1) послужили в качестве исходных при расчете и оптимизации конструкции узлов КРВ.

Таблица 1.

Параметр	Значение	Ед. измерения
$f$	95	ГГц
$V_o$	15	кВ
$I_o$	1.8	А
$R_r$	0.25	мм
$R_n$	0.20	мм
$B_\phi$	0.9	Тл

## 1. Электронная пушка

Для выбранных параметров электронного пучка плотность тока в нем при транспортировке в трубе дрейфа должна составлять около  $1400 \text{ А/см}^2$ . Поскольку в настоящее время термоэмиссионные катоды с приемлемым сроком службы позволяют получать ток с плотностью  $10...20 \text{ А/см}^2$ , то для разрабатываемого прибора требовалось разработать электронную пушку со сходящимся пучком, имеющую микропервианс  $1,0 \text{ мкА/кВ}^{3/2}$  и коэффициент

компрессии около 100. Форма электродов и осевое распределение магнитного поля для каждой конструкции были оптимизированы в результате численных расчетов с помощью комплекса программ PARS.

На основе указанных исходных данных была разработана конструкция электронной пушки типа пушки Пирса со сферическим катодом, позволяющая получить электронный пучок с заданными параметрами. Для подавления теплового расширения потока и обеспечения дальнейшей устойчивости электронного пучка в трубе дрейфа была выбрана схема с магнитно-экранированным катодом. На рис.1 представлены форма электродов разработанной электронной пушки, силовые линии фокусирующего магнитного поля и распределение напряженности электрического поля, рассчитанное с помощью комплекса программ PARS. В данной конструкции электронной пушки максимальная напряженность поля 158 кВ/см создается на внешней кромке анода. Данная величина в два раза ниже приемлемой с точки зрения опасности электрического пробоя для вакуумных приборов.

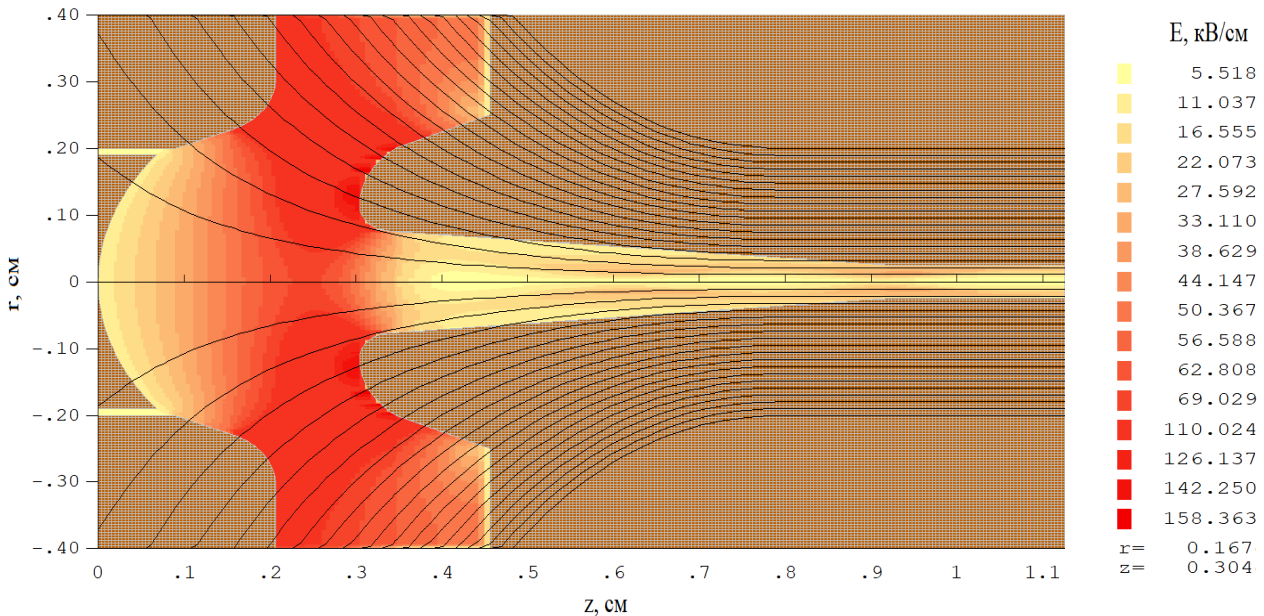


Рис. 1 Конструкция разработанной электронной пушки и результаты ее расчета.

Численный анализ проводился методом последовательных приближений по пространственному заряду с использованием 140 трубок тока для дискретизации электронного потока с катода. Зависимость микропервеанса

электронной пушки от номера итерации приведена на рис. 2а. Значение силы тока эмиссии с катода, полученное в результате сходимости итераций, составило 1.8 А, Распределение плотности тока эмиссии по радиусу катода представлено на рис.2б. За счет подобранной формы электродов удалось обеспечить работу катода в режиме ограничения плотности пространственным зарядом с плотностью тока эмиссии в интервале от 10 до 18 А/см<sup>2</sup>.

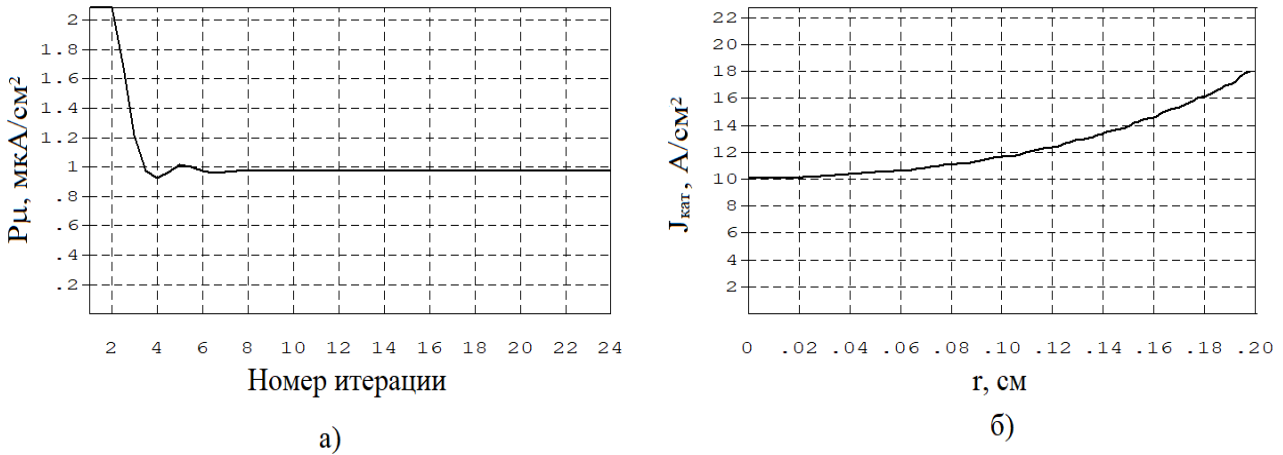


Рис. 2 Зависимость микропервеанса от номера итерации (а) и радиальное распределение плотности тока эмиссии на катоде (б).

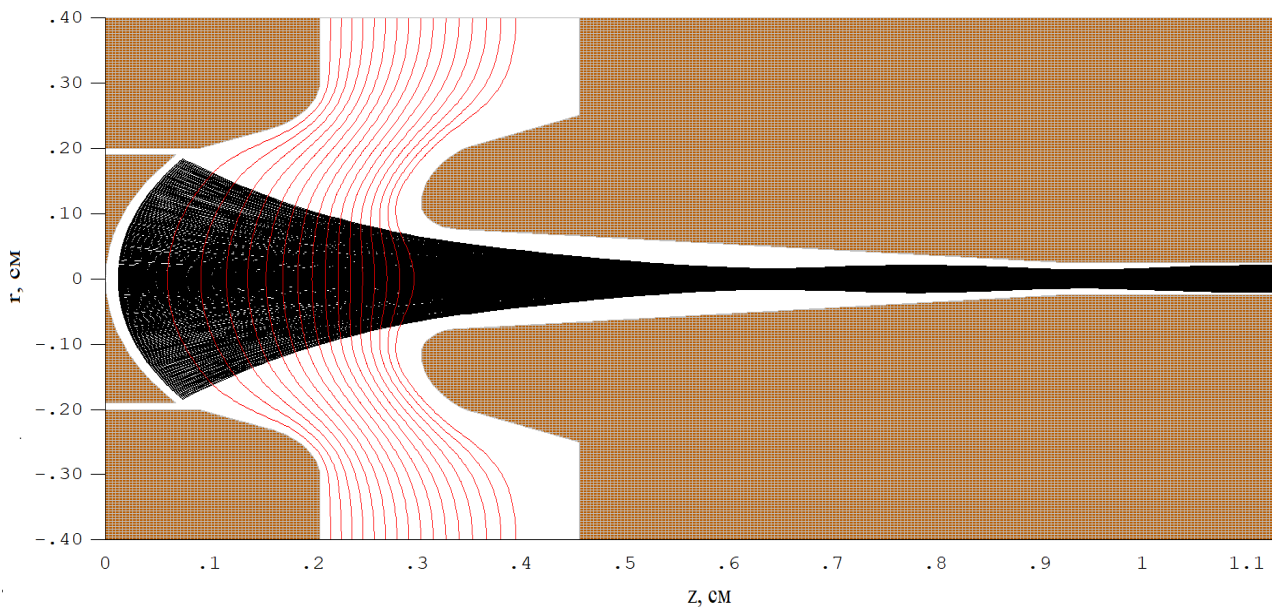


Рис. 3 Траектории электронов (черный цвет) и эквипотенциали электрического поля (красный цвет) в электронной пушке.

Траектории электронов и эквипотенциали электрического поля, установившиеся в результате итераций по пространственному заряду, показаны



на рис.3. Как видно из рисунка, разработанная электронно-оптическая система электронной пушки обеспечивает плавное сжатие эмитированного катодом электронного пучка с минимальными пульсациями. Коэффициент компрессии разработанной электронной пушки достигает 100, что является весьма хорошим результатом для высоко-первиансных термоэмиссионных электронных пушек со сходящимся электронным потоком.

При конструировании электронных пушек КРВ миллиметрового диапазона из-за малого размера поперечных размеров электронных потоков обязательно необходимо учитывать влияние начального разброса скоростей электронов, эмитированных с катода на их дальнейшую транспортировку в приборе [15]. Для этой цели был разработан алгоритм учета влияния разброса поперечных составляющих тепловых скоростей электронов на катоде, работающем в режиме ограничения плотности тока пространственным зарядом. Начальный разброс по скоростям электронов вблизи поверхности термокатода зависит от его температуры  $T_k$ . В режиме ограничения плотности пространственным зарядом все электроны, эмитированные с поверхности катода, направляются к аноду. В этом случае электроны вблизи поверхности катода можно рассматривать, как идеальный газ, имеющий температуру  $T_k$ . Режим ограничения плотности тока пространственным зарядом является наиболее критичным с точки зрения влияния тепловых скоростей, поскольку в этом режиме эквивалентная температура электронов является наибольшей. Поскольку в алгоритмах программ электронно-оптического модуля PARSTATIC электроны эмитируются с эквипотенциальных поверхностей, то можно считать, что разброс касательных к поверхности составляющих скоростей электронов описывается распределением Максвелла для двух степеней свободы:

$$f(v_{\perp}) = 2 \frac{mv_{\perp}^2}{kT_k} \exp\left(-\frac{mv_{\perp}^2}{kT_k}\right) \quad (1)$$

В соответствии с этим распределением с каждого элементарного отрезка эквипотенциальной стартовой поверхности эмитируется  $N_a$  угловых групп



электронов, имеющих равный ток, с различными значениями угла влета, соответствующими разбиению плотности вероятности (1) на отрезки равной вероятности. При этом интервал изменения поперечной составляющей скорости ограничивается конечным значением, соответствующим обычно 99% вероятности. Таким образом, при численном анализе не учитывается незначительная часть тепловых электронов, имеющих экстремальные поперечные компоненты скоростей на катоде. Такой подход позволяет корректно учесть вклад всех испускаемых с катода электронов и проанализировать динамику подавляющего большинства тепловых электронов для различных значений температуры катода  $T_k$ . Алгоритм был успешно протестирован для случая плоского диода и реализован в программах комплекса PARS.

С помощью данного алгоритма разработанная конструкция электронной пушки была исследована на влияние теплового разброса поперечных скоростей. На рис.4 приведены распределения плотности тока в выходном сечении электронной пушки для случая «холодного» электронного пучка (без учета тепловых скоростей) и для случаев температуры катода  $T_k=1100\text{K}$  и  $T_k=1500\text{K}$ .

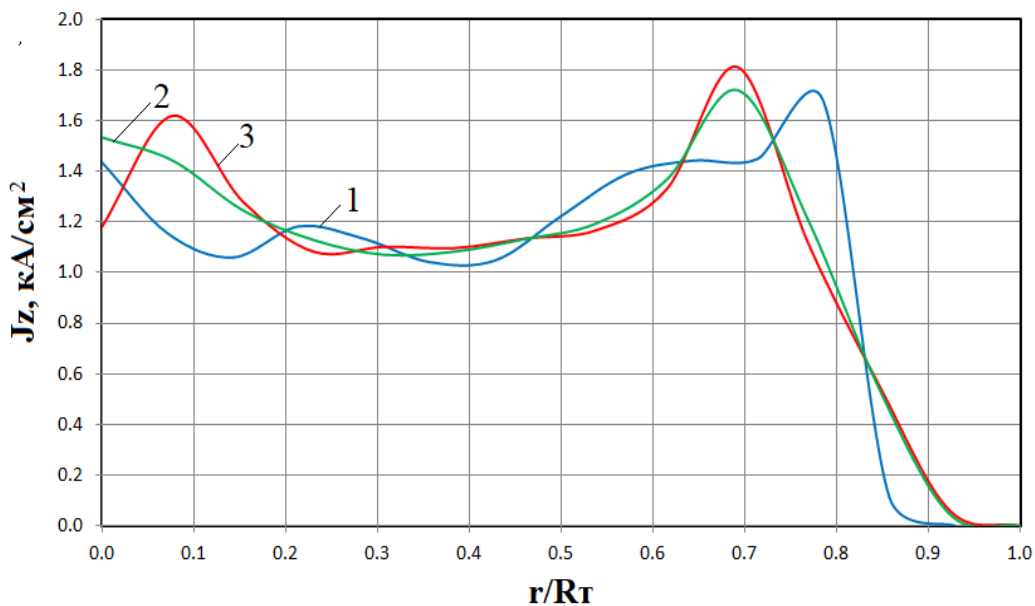


Рис. 4 Зависимости плотности тока от радиуса, нормированного на радиус трубы дрейфа, в выходном сечении электронной пушки для холодного пучка (кривая 1), теплового с  $T_k=1100\text{K}$  (кривая 2) и  $T_k=1500\text{K}$  (кривая 3).

Из анализа распределений следует, что в электронном пучке происходит незначительное перераспределение плотности тока с небольшим расплыванием внешней границы пучка (около 5%). Об этом же свидетельствует приведенное на рис.5 сравнение фазовых объемов «холодного» (рис.5а) и «горячего» с  $T_k=1500\text{K}$  (рис.5б) электронных потоков в выходном сечении электронной пушки.

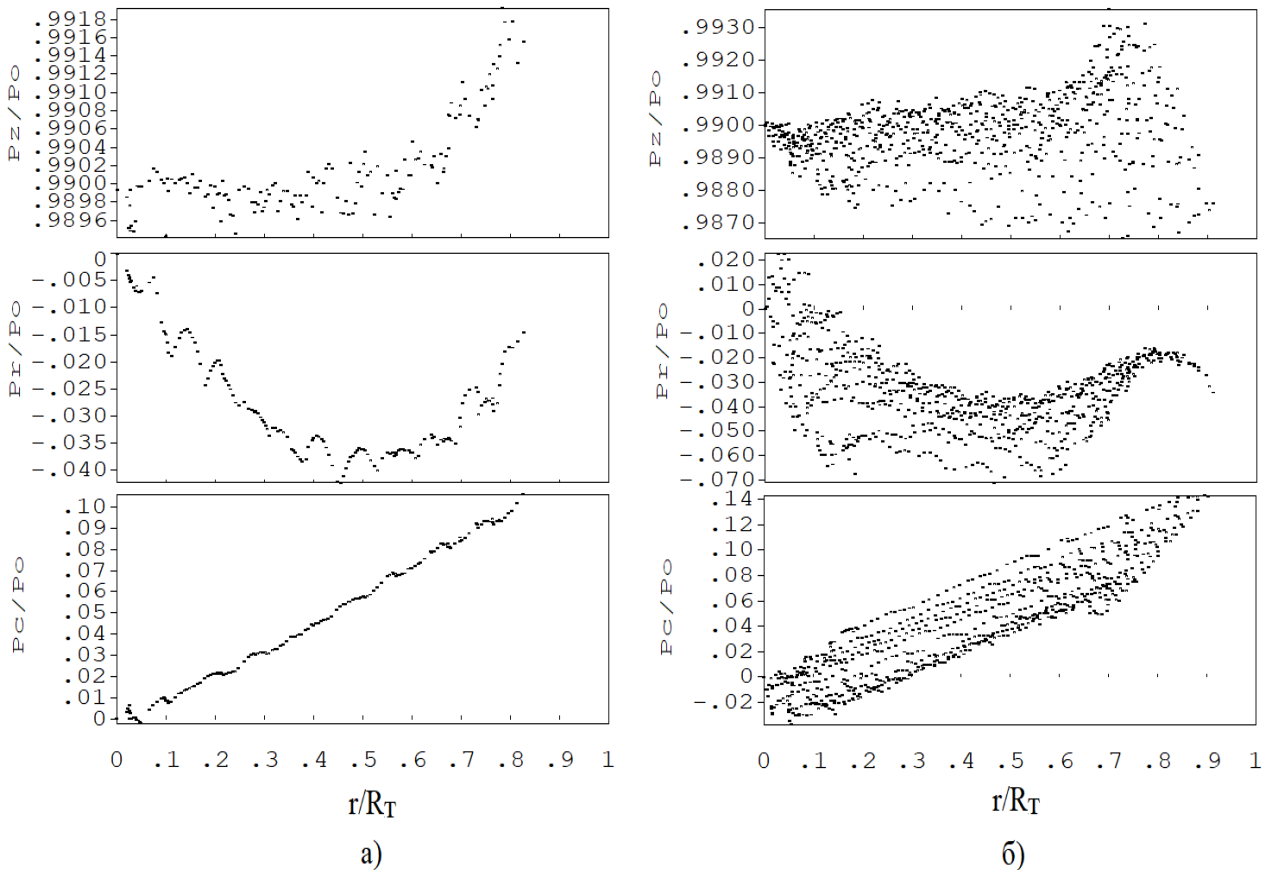


Рис. 5. Зависимости продольной, радиальной и азимутальной компонент импульса электронов в выходном сечении электронной пушки для «холодного» (а) и «горячего с  $T_k=1500\text{K}$  (б) электронных потоков.

При численном моделировании динамики тепловых электронов использовалось 11 угловых групп ( $N_a=11$ ), а общее число трубок тока при расчетах составляло 770. В целом выбранная конструкция электронной пушки с магнитно-экранированным катодом позволяет избежать сильного расплывания пучка за счет теплового разброса скоростей на катоде.

## 2. Транспортировка сформированного электронного пучка

Для исследования устойчивости сформированного электронной пушкой электронного потока во всем приборе был проведен численный анализ

транспортировки пучка через систему взаимодействия и коллектор в статическом режиме (без входного СВЧ сигнала). При этом моделирование проводилось для теплового электронного пучка с  $T_k=1500\text{K}$ . На рис.6 представлены осевое распределение фокусирующего магнитного поля (рис.6а), конструкция всего прибора, а также эквипотенциалы электростатических полей и траектории тепловых электронов, установившиеся в результате итераций по пространственному заряду, в статическом режиме (рис.6б).

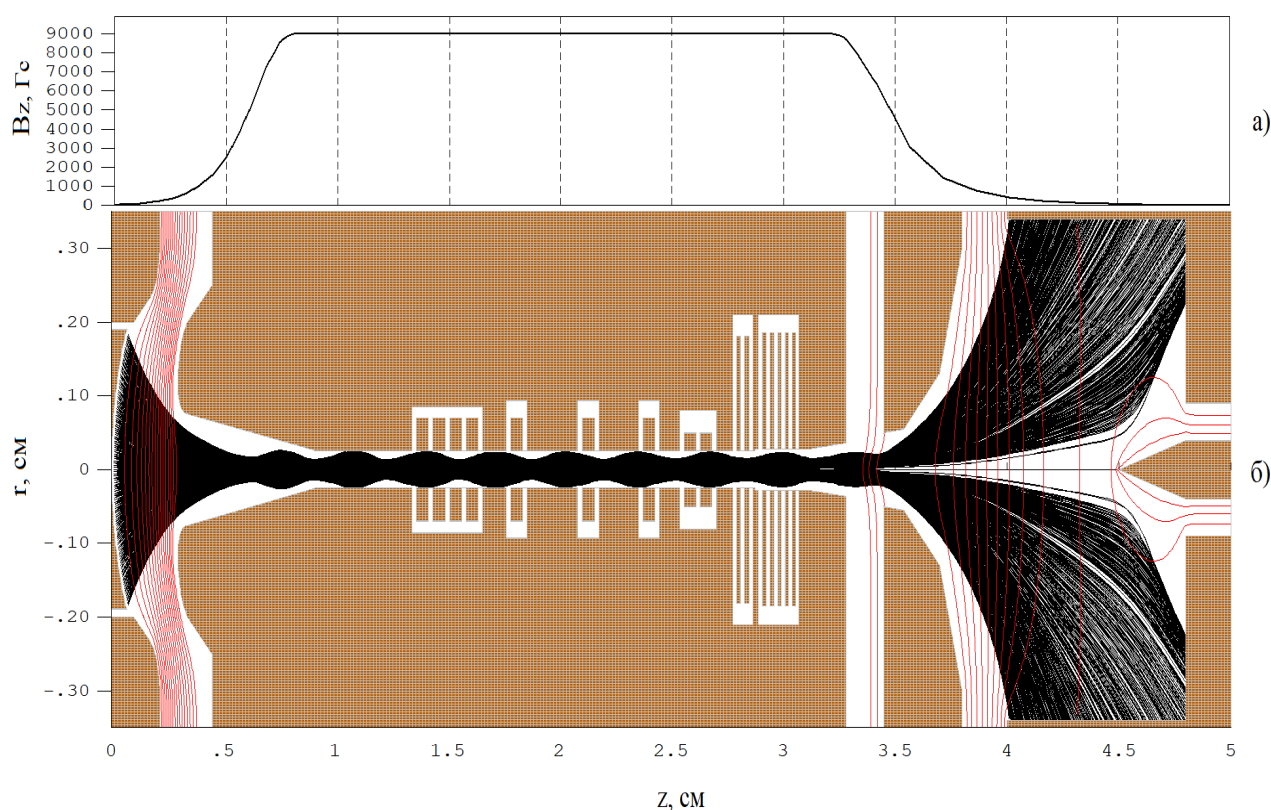


Рис. 3. Осевое распределение фокусирующего магнитного поля (а), конструкция разработанного КРВ, эквипотенциалы электростатического поля (красные кривые) и траектории тепловых электронов (черные кривые) в статическом режиме работы прибора (б).

Система взаимодействия разработанного КРВ состоит из семи многоззорных резонаторов, изображенных на рис.6. Оседание отработанных в системе взаимодействия электронов происходит в двухступенчатом коллекторе с пониженным потенциалом. 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, с

учетом особенностей вышеизложенного алгоритма учета теплового разброса поперечных скоростей электронов на катоде, в разработанной конструкции обеспечивается как минимум 99% токопрохождение сформированного электронного потока.

### 3. Рекуперация энергии в коллекторной системе в статическом режиме

Для повышения общего КПД клистрона была разработана конструкция магнитно-экранированного двухступенчатого коллектора с пониженным потенциалом. Попадая в такой коллектор, отработанные в системе взаимодействия электроны тормозятся и отдают часть остаточной мощности  $P_{рек}$  обратно в цепь питания прибора. За счет этого происходит рекуперация энергии, что позволяет заметно снизить тепловую нагрузку на коллектор и увеличить общий КПД устройства [16] как в статическом, так и динамическом режимах его работы. Эффективность рекуперации характеризуется отношением рекуперированной мощности к остаточной мощности электронного пучка, попадающего в коллектор  $P_{кол}$ :

$$\eta_{рек} = \frac{P_{рек}}{P_{кол}} = \frac{P_{рек}}{P_0 - P_{СВЧ} - P_{рас}}, \quad (2)$$

где  $P_0 = I_0 V_0$  – мощность электронного потока на входе в систему взаимодействия,  $P_{СВЧ}$  – ВЧ мощность, генерированная электронным потоком в выходной системе (в статическом режиме  $P_{СВЧ} = 0$ ),  $P_{рас}$  – мощность, рассеиваемая электронами в виде тепла в системе взаимодействия. Мощность рекуперации и выигрыш в КПД тем больше, чем сильнее понижен потенциал коллектора. Однако сильное понижение потенциала коллектора может привести к возврату части электронов обратно в систему взаимодействия и, как следствие, ухудшить ВЧ характеристики и вызвать самовозбуждение прибора, а иногда и выход его из строя. Это накладывает определенные ограничения на степень понижения потенциала коллектора. В этом случае применяется многоступенчатая рекуперация.

В рассматриваемом приборе была использована схема двухступенчатой рекуперации с отражательной иглой, имеющей потенциал катода. В результате

теоретических расчетов была определена конструкция коллектора, оптимизированная для работы в статическом и динамическом режимах (рис.7).

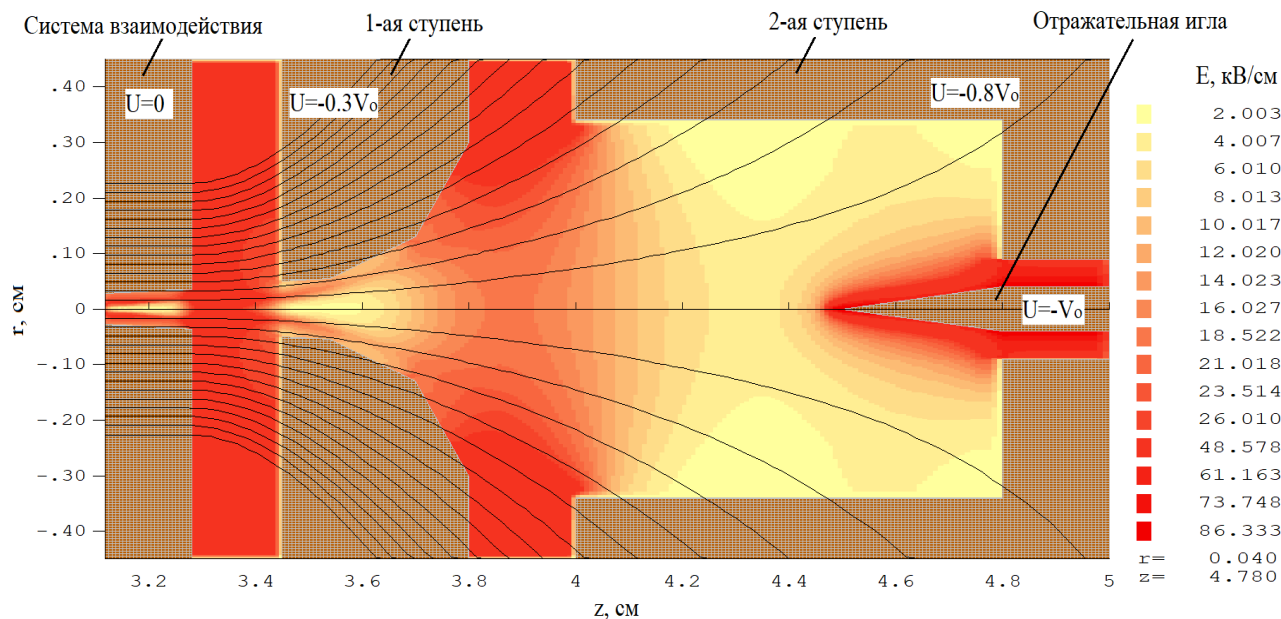


Рис. 7. Конструкция коллектора с двухступенчатой рекуперацией, силовые линии фокусирующего магнитного поля и распределение электростатических полей.

Рассеяние обработанных электронов в такой коллекторной системе происходит как за счет ослабления фокусирующего магнитного поля, так и за счет воздействия неоднородных тормозящих электростатических полей, создаваемых в коллекторе системой электродов. Максимальная напряженность электрического поля, возникающая вблизи отражательного электрода, составляет 86 кВ/см и не создает опасности пробоя.

Траектории тепловых электронов и эквипотенциали электрического поля в статическом режиме представлены на рис.8. В этом режиме рассеяние мощности всех электронов происходит на второй ступени коллектора, а эффективность рекуперации составляет 80%.

Однако в коллекторных системах с рекуперацией большую роль в распределении токооседания на электроды могут оказывать вторичные электроны, выбиваемые со стенок коллектора [17]. В устройствах с низкопервечанскими электронными пучками достаточно определить величину обратного тока вторичных электронов в кинематическом приближении, чтобы



оценить это влияние. Для высокопереванских же пучков необходим учет пространственного заряда вторичных электронов.

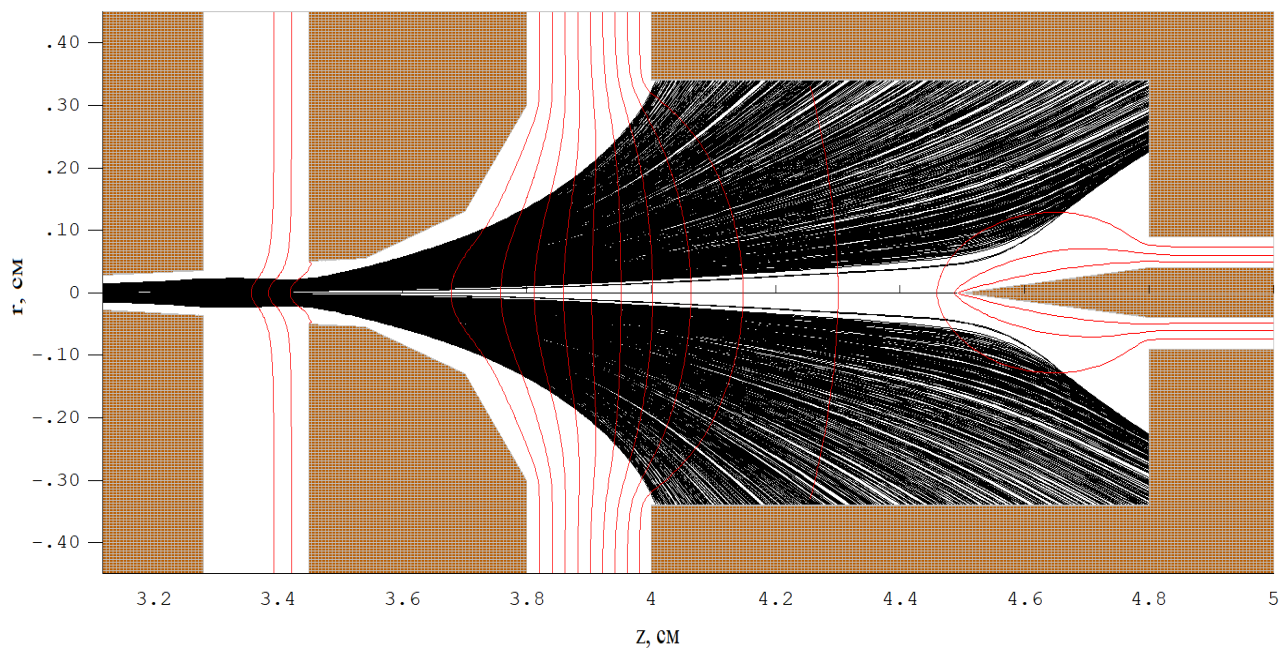


Рис. 8. Траектории тепловых электронов и эквипотенциали электрического поля в двухступенчатом коллекторе с рекуперацией в статическом режиме.

Для этой цели был разработан алгоритм учета влияния вторичных электронов в коллекторной системе. Алгоритм предусматривает эмиссию вторичных электронов трех видов: упруго отраженных, истинно-вторичных и не упруго отраженных. В численной модели непрерывные распределения по энергиям и углам вылета вторичных электронов заменяются дискретными. Число энергетических и угловых групп зависит от необходимой точности представления вторичной электронной эмиссии. Угловые направления вылета вторичных электронов («трубок тока») и коэффициенты вторичной эмиссии различных энергетических групп задаются в зависимости от энергии падающих частиц и материала коллектора. Для этого используются формулы для значений коэффициентов вторичной эмиссии и вероятностные распределения работы [18]. Данные формулы основаны на экспериментальных данных, а вероятностные распределения прошли успешное сравнение с экспериментальными данными для гиротронов [19] и ЛБВ [20]. Так же, как и в вышеизложенном алгоритме учета тепловых электронов, эмиссия вторичных электронов в новом алгоритме осуществляется не случайным образом с

помощью метода Монте-Карло, а во всем спектре энергий и углов распределения вторичных электронов на коллекторной поверхности. Это требует расчета большого количества траекторий на каждой итерации по пространственному заряду, но позволяет корректно учесть эмиссию, токооседание и пространственный заряд вторичных электронов. При этом на каждой итерации по пространственному заряду сначала рассчитываются первичные пучки, затем определяются начальные данные для вторичных частиц и рассчитываются их траектории. Вторичные электроны при оседании на стенки коллектора, в свою очередь, выбивают следующее поколение вторичных электронов. Процесс генерации вторичных электронов прекращается, когда ток выбиваемых частиц не превышает 1% от тока первичных электронов. Обычно для этого достаточно учесть два, три поколения вторичных электронов. Алгоритм был реализован в программах комплекса PARS.

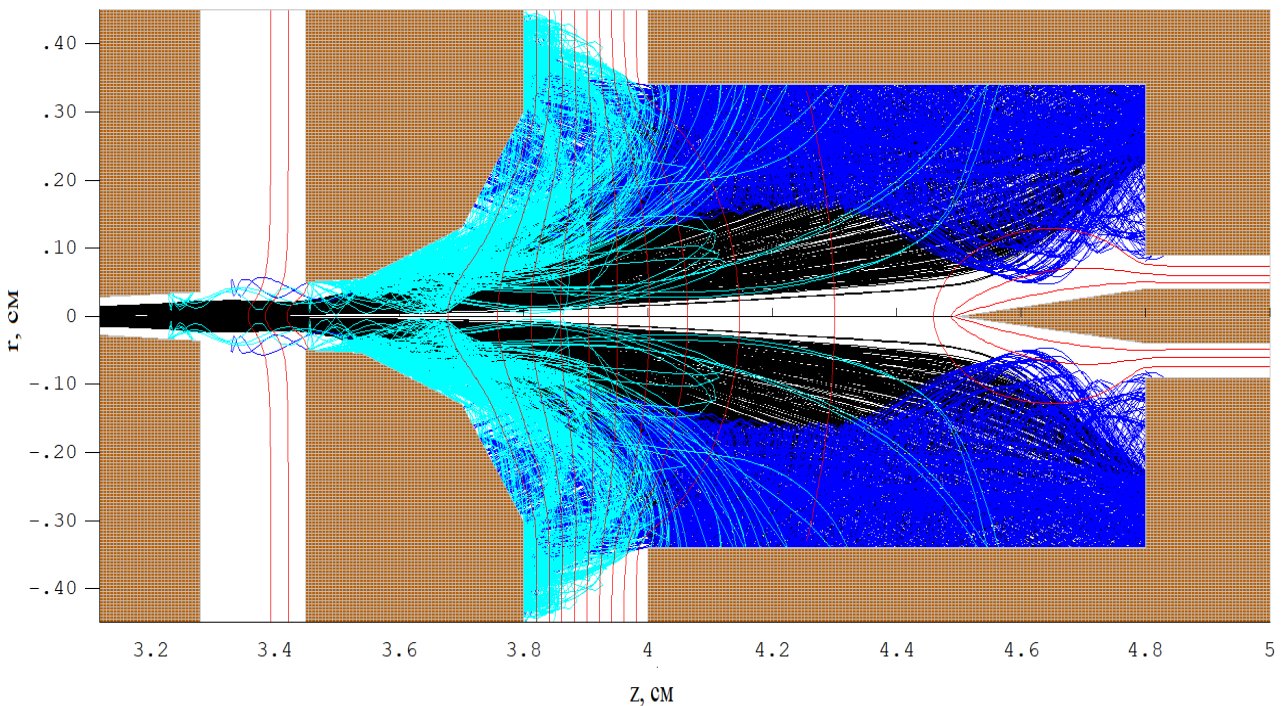


Рис. 9. Траектории первичных (черные кривые), первого поколения вторичных (синие кривые) и второго поколения вторичных (голубые кривые) электронов и эквипотенциали электрического поля в двухступенчатом коллекторе с рекуперацией в статическом режиме.



С помощью данного алгоритма были проведены исследования влияния вторичных электронов на процессы в разработанной конструкции коллекторной системы. На рис.9 показаны установившиеся в результате сходимости итераций по пространственному заряду траектории первичных и двух поколений вторичных электронов. При расчетах использовалось 770 трубок тока для представления первичного электронного пучка и около 15 тысяч трубок тока для моделирования вторичных электронов. Как видно из рисунка, вторичные электроны, выбиваемые из стенок второй ступени коллектора, в основном оседают на этой же ступени. Около одной трети вторичных электронов попадает на первую ступень. Таким образом, происходит перераспределение токов на электродах коллектора. Ток первой ступени составляет около 13% от  $I_0$ , а ток второй ступени 86% от  $I_0$ . Это приводит к небольшому уменьшению значения эффективности рекуперации в статическом режиме до 73%. Вместе с тем, анализ показывает, что обратного тока в систему взаимодействия не наблюдается, что свидетельствует об эффективности разработанной конструкции коллектора в статическом режиме.

### **Заключение**

В результате исследований разработана конструкция магнитно-экранированной высокопервиансной электронной пушки с коэффициентом компрессии, равным 100, а также конструкция электронно-оптической системы прибора, обеспечивающая формирование и 99% токопрохождение плотного электронного потока (до  $1.4 \text{ кА/см}^2$ ) с силой тока 1.8 А и ускоряющим напряжением 15 кВ через систему взаимодействия мощного КРВ миллиметрового диапазона в статическом режиме. Разработан и реализован в комплексе программ PARS алгоритм учета теплового разброса электронов на катоде. Проведенные с помощью данного алгоритма исследования показали, что разработанная конструкция электронно-оптической системы клистрона является устойчивой к возмущениям электронного потока, вызванных тепловым разбросом электронов по скоростям на катоде. Для повышения полного КПД прибора была предложена конструкция двухступенчатого

коллектора с рекуперацией. Был разработан и реализован в комплексе программ PARS алгоритм учета влияния вторичных электронов на физические процессы в коллекторе. Численный анализ, проведенный с его помощью, показал, что в статическом режиме в предложенном двухступенчатом коллекторе за счет вторичных электронов не возникает обратного тока, но наблюдается небольшое уменьшение эффективности рекуперации за счет перераспределения токов ступеней.

Разработанная конструкция электронно-оптической системы обеспечивает формирование и транспортировку плотного электронного потока, с общей мощностью 27 кВт, что позволяет при использовании эффективной конструкции системы взаимодействия получить выходную мощность клистрона от 6 до 8 кВт.

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. 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.
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. Lü S. et al. Stability analysis of a planar multiple-beam circuit for W-band high-power extended-interaction klystron // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62. No.9. P.3042-3048.

5. S. Chen S. et al. Particle-in-cell simulation and optimization of multigap extended output cavity for a W-band sheet-beam EIK // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42. No.1. P.91-98.
6. 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)
7. Тореев А.И., Фёдоров В.К. Усилительный клистрон с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона // Прикладная физика. 2011. № 4. С.109–114.
8. Царев В.А., Горлин О.А., Нестеров Д.А. Многолучевой автогенератор W-диапазона с резонатором распределенного взаимодействия // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/11/text.pdf>
9. Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н. Комплекс программ для численного анализа электровакуумных приборов клистронного типа // Журнал Радиоэлектроники. 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)
10. Сандалов А.Н., Родякин В.Е. Комплексная программа анализа динамики электронного потока в клистроне // Межвузовский сборник “Вопросы электронной техники”, Саратов, 1988, 15 с.
11. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. Faillon G., Thaler Y. Animation of Nonlinear Electron-Wave Interaction in Klystrons. // KEK report 1/1997. P.185-194.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/341600037\\_Animation\\_of\\_Nonlinear\\_Electron-Wave\\_Interaction\\_in\\_Klystrons](https://www.researchgate.net/publication/341600037_Animation_of_Nonlinear_Electron-Wave_Interaction_in_Klystrons)
12. 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. September 2000, Beijing, China. P.299 - 302.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/895680>
13. Shen B., Ding Y., Sandalov A.N., Rodyakin V.E., Chashurina A.N. Computer

- simulation of 100KW L-band CW broadband multi-beam klystron // IVESC2004 – 5th International Vacuum Electron Sources Conference Proc. China, Beijing. 2004. P.312-314. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1414252>
14. Shen B., Ding Y., Zhang Z. et al. Research and Development of S-Band High Power Multibeam Klystron // IEEE Tr. on Electron Devices. 2014. Vol.61. No.6. P.1848-1853. DOI: [10.1109/TED.2014.2305712](https://doi.org/10.1109/TED.2014.2305712)
15. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. Радио. 1966. 454 с.
16. Сандалов А.Н., Родякин В.Е. Коллекторные системы приборов СВЧ с продольным взаимодействием // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. №9. С.63-76.
17. Лопухин В.М., Родякин В.Е., Сандалов А.Н. Теоретические исследования коллекторных систем СВЧ приборов // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 1985. № 10. С.1-19. URL: [https://www.researchgate.net/publication/253786613\\_Theoretical\\_study\\_of\\_collector\\_systems\\_for\\_microwave\\_devices\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/253786613_Theoretical_study_of_collector_systems_for_microwave_devices_Review)
18. Vaughan J.R.M. A new formula for secondary emission yield // IEEE Trans. Electron Devices. 1989. Vol. 36. No.9. P.1963-1967.
- Valfells A., Singh A., Kolander M.J., Granatstein V.L. Advacements in Codes for Computer Aided Design of Depressed Collectors and Tracing of Backscattered Electrons–Part II: Improvements’ in Modeling of the Physics of Secondary Electron Emission and Backscattering // IEEE Trans. of Plasma Sci. 2002. Vol. 30. No.3. P.1271-1276. URL: [kennarar.ru/is/av/BSCAT\\_I.pdf](http://kennarar.ru/is/av/BSCAT_I.pdf)
19. Белугин В.М., Васильев А.Е., Ветров В.В. Парфенова А.С., Пикунов В.М., Розанов Н.Е. Разработка и тестирование программы расчета коллекторных систем с учетом каскада вторичных электронов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12. № 11. С. 61-68.

**Для цитирования:**

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