

DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.8

УДК 621.385.624

РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В КОЛЛЕКТОРЕ МОЩНОГО КЛИСТРОНА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В. Е. Родякин¹, В. М. Пикунов¹, В. Н. Аксенов^{1,2}

¹ 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

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

Статья поступила в редакцию 2 июня 2020 г.

Аннотация. Представлены результаты теоретического исследования рекуперации энергии отработанного электронного потока в коллекторе мощного многорезонаторного клистрона с распределенным взаимодействием на частоту 95ГГц. Численные исследования проводились с помощью программного комплекса PARS с учетом влияния вторичных электронов на физические процессы в коллекторной системе. В результате проведенных исследований была разработана конструкция двухступенчатого коллектора с пониженным потенциалом, обеспечивающим эффективность рекуперации 72% в статическом режиме работы прибора и 63% в динамическом.

Ключевые слова: электронный пучок, клистрон с распределенным взаимодействием, вторичная эмиссия, коллектор с пониженным потенциалом, комплекс программ «PARS», фокусирующее магнитное поле, рекуперация энергии.

Abstract. We present the results of theoretical analysis of depressed collector of the high power W-band extended interaction klystron. The computer code PARS was used for numerical simulation taking into account the secondary electron emission and backscattering from the collector walls surfaces. As a result of optimization, the design of double-stage depressed collector has been developed which provides spent

beam energy recovery efficiency 72% in the static regime and 63% in the dynamic regime of klystron operation.

Key words: PARS computer code, 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 клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ).

Из-за малых размеров сечения пролетного канала в миллиметровом диапазоне для увеличения мощности и силы тока приходится переходить к использованию электронных потоков с высокими значениями плотности тока в пучке (более 1 кА/см^2) [1]. 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. Попадая в такой коллектор, отработанные в системе взаимодействия электроны тормозятся и отдают часть остаточной мощности обратно в цепь питания прибора. За счет этого происходит рекуперация энергии, что позволяет заметно снизить тепловую нагрузку на коллектор и увеличить общий КПД устройства. Однако использование таких систем осложняется опасностью возникновения обратного тока из коллектора в систему взаимодействия, как со стороны медленных первичных электронов, так и со стороны вторичных электронов, выбиваемых с

поверхностей электродов коллектора электронами первичного отработанного пучка. Создаваемое в коллекторной системе с пониженным потенциалом электрическое поле для торможения первичных электронов, для вторичных электронов является ускоряющим в направлении системы взаимодействия, что создает опасность их проникновения в пролетный канал и может вывести прибор из строя. По этим причинам разработка электронно-оптических систем для рекуперации энергии интенсивных электронных потоков является отдельной и весьма сложной задачей, которую необходимо решать при конструировании приборов вакуумной микроэлектроники.

Традиционным лидером в области разработки мощных КРВ миллиметрового диапазона является канадская компания СРІ. 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. Также одноступенчатая рекуперация была использована в КРВ с ленточным электронным пучком, разработанном специалистами Исследовательской лаборатории ВМС США (Naval Research Laboratory, NRL) [3]. Электронный КПД данного КРВ составил 8.6%, а общий КПД был увеличен до 17.2% за счет использования одноступенчатой рекуперации энергии в коллекторе с пониженным потенциалом (-11 кВ). В обоих рекордных по выходной мощности компактных КРВ W-диапазона были использованы одноступенчатые коллекторы с пониженным потенциалом, поскольку из-за небольших значений электронного КПД отработанные электронные потоки на выходе из системы взаимодействия обладали сравнительно небольшим разбросом по энергиям. Это позволило добиться эффективности рекуперации на уровне 60% даже при одноступенчатой рекуперации. При дальнейшем повышении электронного КПД эффективная рекуперация возможна только за счет использования многоступенчатых конструкций коллекторов.

В работах [4,5] была представлена конструкция разработанного мощного КРВ W-диапазона с выходной мощностью на уровне 7 кВт с электронным КПД

32.5%. В приборе используется аксиально-симметричный цилиндрический пучок с плотностью тока в пролетном канале до 1.4 кА/см². Токопрохождение в динамическом режиме составило 94%. В работе [4] также были представлены конструкция двухступенчатого коллектора с пониженным потенциалом и результаты ее исследования в статическом режиме работы прибора (без СВЧ сигнала). Эффективность рекуперации в статическом режиме составила 73% с учетом влияния вторичных электронов. В продолжение этих работ были проведены теоретические исследования физических процессов в разработанном коллекторе в динамическом режиме работы КРВ с целью определения ее эффективности для двухступенчатой рекуперации энергии отработанного электронного потока в динамическом режиме.

При теоретическом анализе использовался программный комплекс PARS, разработанный авторами [6] на основе модернизации программы «Арсенал-МГУ», зарекомендовавшей себя в нашей стране и за рубежом как надежный инструмент для разработки и исследования многочисленных клистронных усилителей. Для моделирования вторичной электронной эмиссии использовался алгоритм, описанный в работе [4]. Выбранные в результате проведенного в этой же работе 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
Мощность немодулированного пучка	P_o	27	кВт
Радиус трубы	R_T	0.25	мм
Радиус пучка	R_n	0.20	мм
Фокусирующее магнитное поле	B_ϕ	0.9	Тл

1. Анализ энергетического спектра отработанных электронов

Рекуперация в коллекторной системе в первую очередь определяется энергетическим спектром электронов после системы взаимодействия, который удобно характеризовать интегральным распределением электронов по энергиям [7]. На рис.1 представлено интегральное распределение по энергиям отработанных в динамическом режиме электронов в выходном сечении последнего резонатора разработанного КРВ. Распределение было получено в результате численного анализа системы взаимодействия с использованием 704 крупных частиц на период [5].

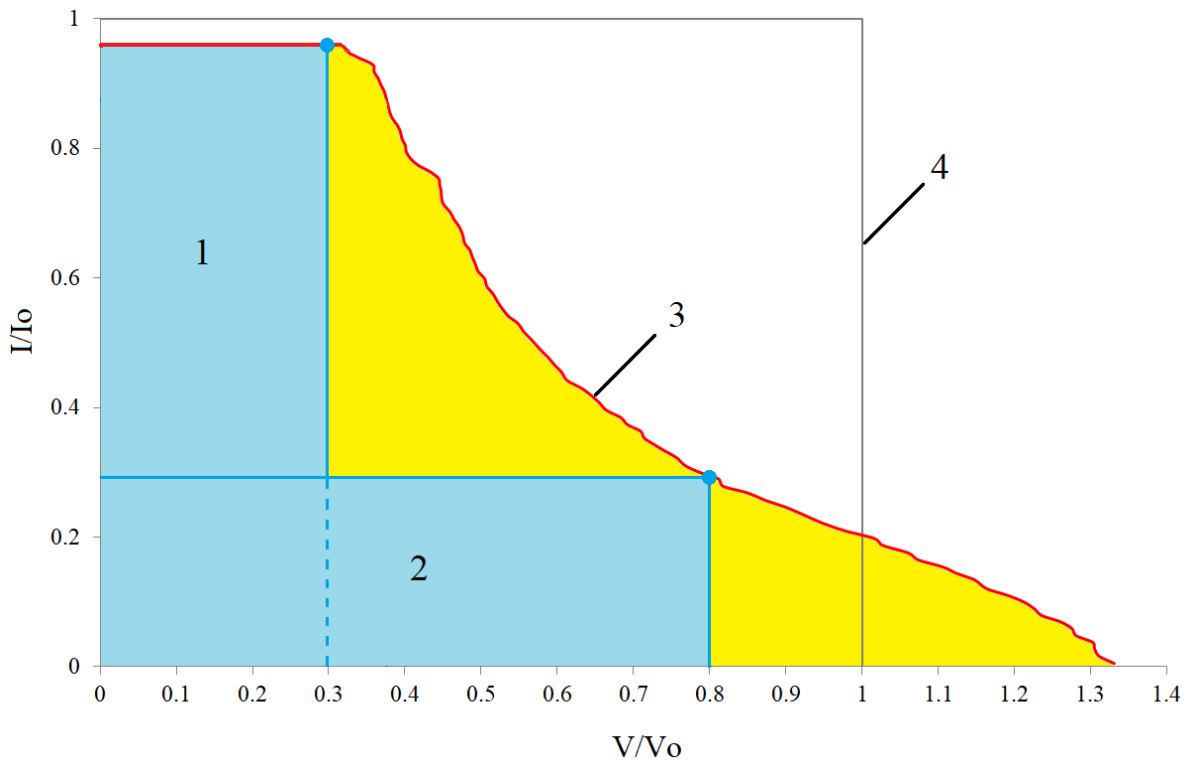


Рис. 1. Интегральное распределение отработанных электронов по энергиям после выходной системы.

Интегральное распределение (красная кривая 3 на рисунке) является энергетической характеристикой электронного потока после выходной системы и представляет собой зависимость тока коллектора I , нормализованного к значению постоянного тока I_0 и обусловленного электронами с полной энергией больше некоторого значения V , от величины этой энергии, нормализованной к постоянному напряжению V_0 . Площадь под этой кривой равна суммарной

мощности отработанных электронов, влетающих в коллектор. Единичная площадь квадрата 4 на рисунке соответствует первоначальной мощности электронного пучка до системы взаимодействия. Таким образом, разница площадей единичного квадрата и под кривой интегрального распределения показывает долю той мощности, которая была затрачена электронным потоком на СВЧ излучение, а также была рассеяна в виде тепла в системе взаимодействия. На этом же рисунке кружочками на кривой интегрального распределения отмечены точки, соответствующие на оси абсцисс относительным потенциалам двух сегментов двухступенчатого коллектора с рекуперацией. В случае идеальной сепарации электронов по энергиям площадь под образованными ступенчатыми кривыми соответствует мощности, рекуперированной в источник питания. Отношение этой мощности (площадь прямоугольников 1 и 2) к мощности пучка после системы взаимодействия (вся площадь под кривой интегрального распределения) характеризует эффективность рекуперации $\eta_{рек}$. Остальная часть мощности отработанного пучка электронов (закрашена на рисунке желтым цветом) рассеивается на электродах коллектора в виде тепла.

Полный КПД η_0 прибора с учетом рекуперации в коллекторе определяется как [7]:

$$\eta_0 = \frac{\eta_T}{1 - \eta_{рек} (1 - \eta_{эл} - \alpha_T)} \quad (1)$$

где $\eta_T = \eta_{эл} \eta_{вых}$ - полный КПД прибора без рекуперации, $\eta_{эл}$ - электронный КПД, $\eta_{вых}$ - КПД выходной системы, α_T - нормированная на величину P_0 мощность, рассеиваемая электронами в виде тепла в системе взаимодействия. Чем больше ступеней коллектора, тем большая часть площади под кривой интегрального распределения перекрывается площадью под ступенчатой кривой, а тем самым и больше эффективность рекуперации и полный КПД, а тепловая нагрузка на коллектор меньше. При заданном числе ступеней коллектора $\eta_{рек}$ зависит от оптимального выбора потенциалов ступеней, при котором площадь под ступенчатой кривой максимальна. Такие оптимизационные расчеты были

проведены для интегрального распределения электронов после выходной системы разработанного КРВ. Результаты представлены на рис.2 в виде зависимости максимально возможных $\eta_{рек}$ (кривая 1) и η_0 (кривая 2) от числа ступеней коллектора с рекуперацией. При расчетах использовались следующие значения параметров из работы [5] $\eta_{эл}=0.325$, $\eta_{вых}=0.8$, $\alpha_T=0.055$.

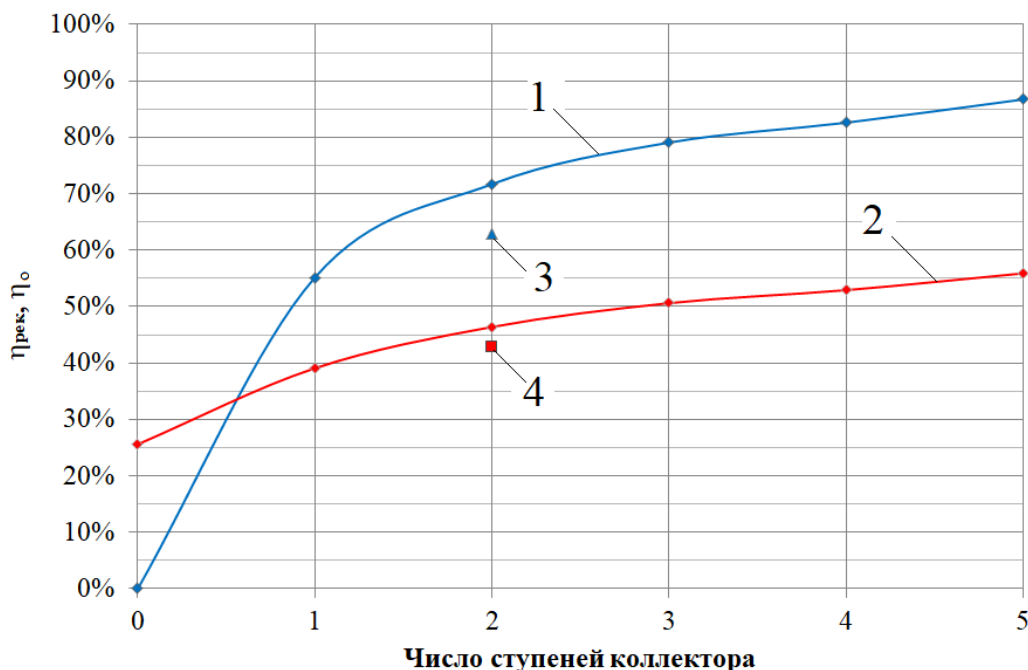


Рис. 2. Зависимости максимально возможных КПД рекуперации (кривая 1) и полного КПД (кривая 2) от числа ступеней коллектора, а также полученные в результате расчетов значения КПД рекуперации (точка 3) для разработанного двухступенчатого коллектора и полного КПД (точка 4) для разработанного КРВ.

Как видно из рисунка, выигрыш от увеличения числа ступеней рекуперации постепенно уменьшается. Для того, чтобы не усложнять систему питания прибора, была выбрана двухступенчатая рекуперация, которая при данном уровне электронного КПД позволяет значительно повысить общий КПД прибора.

Однако полученные оценки на основе интегрального распределения предполагают, что в коллекторе осуществляется идеальная сепарация электронов по энергиям и каждый электрон оседает на электроде с потенциалом, соответствующем его энергии на влете в коллектор. На практике этого не удастся добиться в мощных приборах, поскольку движение электронов

в коллекторе происходит под действием неоднородных электрического и магнитного полей, а также полей пространственного заряда, что осложняет сепарацию электронов по энергиям.

Также сильное торможение электронов может приводить к их обратному движению в систему взаимодействия, нарушать характеристики прибора и в некоторых случаях выводить прибор из строя. Кроме того, при оседании на электроды коллектора влетевших в коллекторную систему первичных электронов с поверхности электродов происходит эмиссия вторичных электронов, которые, двигаясь в системе, могут оседать на другие электроды и перераспределять токи между сегментами.

По этим причинам потенциалы двух ступеней коллектора были выбраны несколько ниже оптимальных и составили $-0.3V_0$ и $-0.8V_0$. Согласно оценкам, проведенным на основе интегрального распределения для выбранных потенциалов ступеней, идеальное значение эффективности рекуперации составляет 70%. Как показали дальнейшие численные исследования, с помощью разработанной конструкции двухступенчатого коллектора удалось добиться в динамическом режиме эффективности рекуперации 63% (точка 3 на рис.2) и увеличения полного КПД прибора до 43% (точка 4).

2. Результаты исследований рекуперации энергии в разработанном двухступенчатом коллекторе

В рассматриваемом приборе была реализована схема двухступенчатой рекуперации с отражательной иглой, имеющей потенциал катода [8]. В результате теоретических расчетов была определена конструкция коллектора, оптимизированная для работы в статическом и динамическом режимах (рис.3). Движение отработанных электронов в такой коллекторной системе происходит в неоднородном магнитном поле, в тормозящем электростатическом поле, создаваемом в коллекторе системой электродов с различным потенциалом, и в поле пространственного заряда первичных и вторичных электронов. На рис.3 приведены силовые линии магнитного поля фокусирующей системы, а также распределение напряженности суммарного электрического поля в

динамическом режиме работы прибора. Максимальная напряженность электрического поля, возникающая вблизи отражательного электрода, составляет 108 кВ/см и не создает опасности вакуумного пробоя.

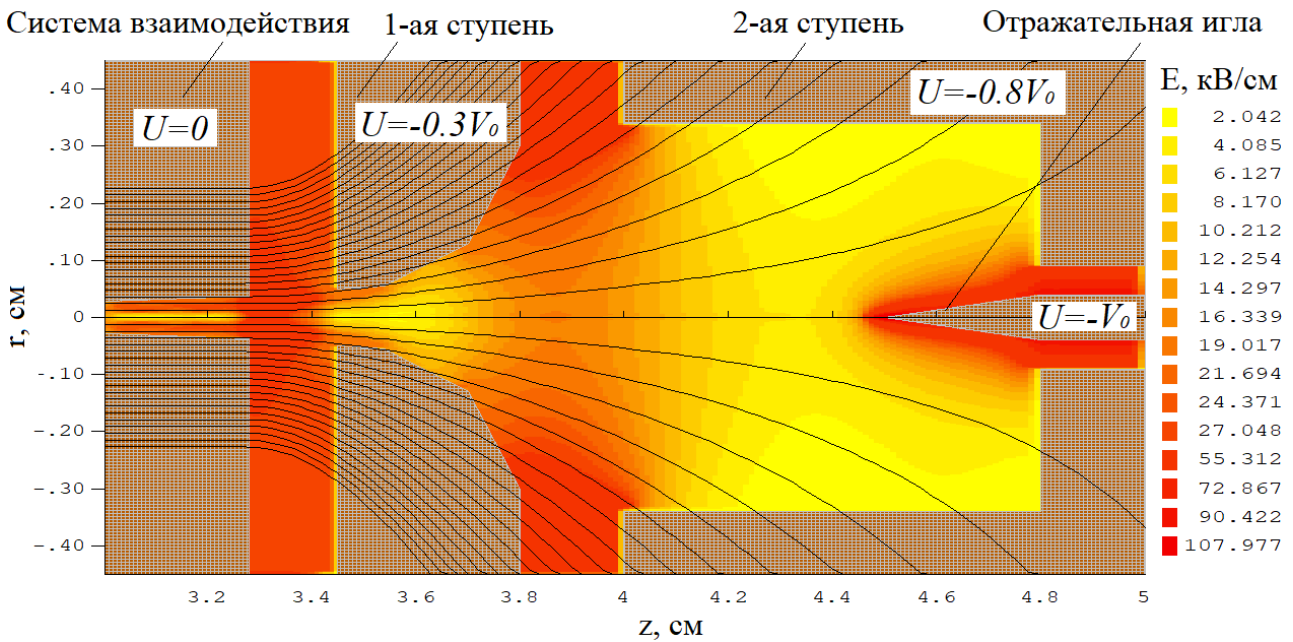


Рис. 3. Конструкция коллектора с двухступенчатой рекуперацией, силовые линии фокусирующего магнитного поля и распределение электростатических полей в динамическом режиме.

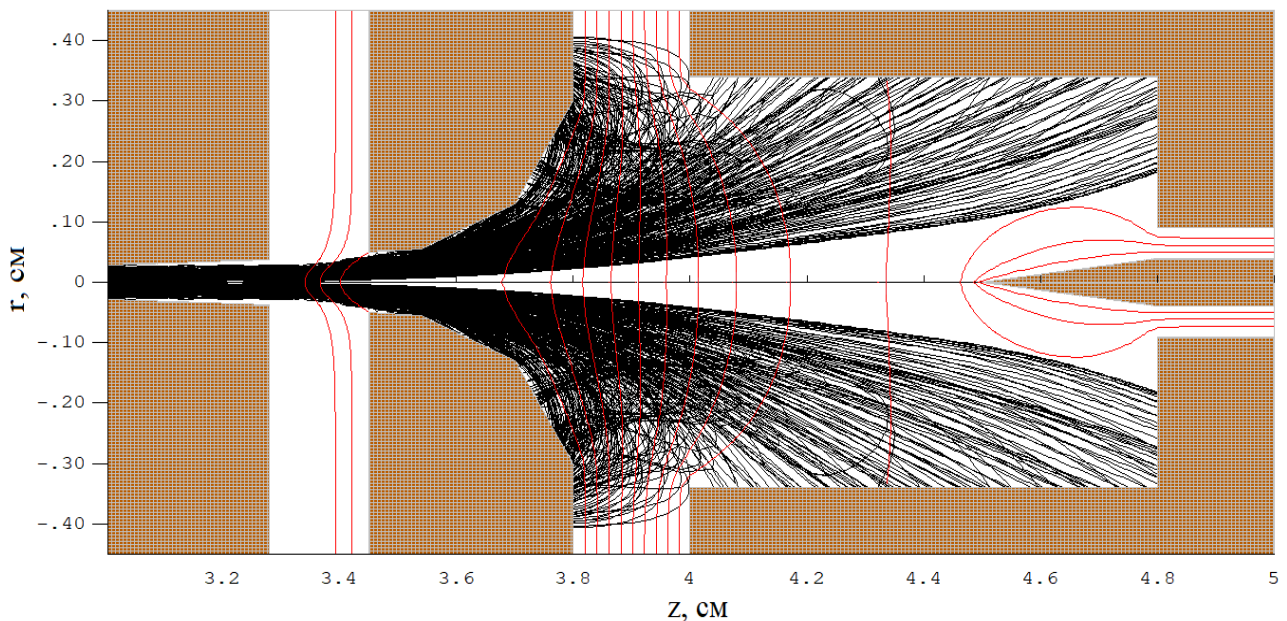


Рис. 4. Траектории первичных электронов и эквипотенциали электрического поля в двухступенчатом коллекторе с рекуперацией в динамическом режиме.

Траектории первичных электронов и эквипотенциали электрического поля в динамическом режиме представлены на рис.4. Численный анализ проводился

методом последовательных приближений по пространственному заряду с использованием 704 трубок тока для дискретизации электронного потока. В качестве начальных данных для электронов использовались результаты численных расчетов системы взаимодействия КРВ [5]. После системы взаимодействия в коллектор влетают электроны, составляющие 94% начального тока пучка I_0 , из которых 68% I_0 попадают на первую ступень, 24% I_0 – на вторую ступень, и только небольшая часть 2% I_0 , состоящая из самых медленных электронов, возвращаются обратно в систему взаимодействия.

Электроны, попадающие на первую и вторую ступени коллектора, выбивают с их поверхности вторичные электроны. Для моделирования вторичной электронной эмиссии использовался алгоритм, описанный в работе [4] и включенный в комплекс программ PARS. На каждой итерации по пространственному заряду сначала рассчитывались траектории первичных электронов, затем определялись начальные данные для вторичных частиц и рассчитывались их траектории. Вторичные электроны при оседании на стенки коллектора, в свою очередь, выбивали следующее поколение вторичных электронов и так далее. При расчетах для моделирования вторичной электронной эмиссии понадобилось учесть только два поколения вторичных электронов, так как ток и влияние следующих поколений были незначительными. При этом для численного моделирования двух поколений вторичных электронов потребовалось около 15 тысяч трубок тока.

На рис.5 показаны установившиеся в результате сходимости итераций по пространственному заряду траектории первичных и двух поколений вторичных электронов. Как видно из рисунка, вторичные электроны, выбиваемые из стенок первой ступени коллектора, в основном оседают на этой же ступени. Только небольшая часть вторичных электронов, выбиваемых с поверхности второй ступени (около 1.5% I_0), попадает на первую ступень. Этого удалось добиться выбором формы электродов ступеней, при которых большинство выбиваемых вторичных электронов фокусируется на той стороне первой

ступени, на которой созданное в коллекторной системе электрическое поле для них является тормозящим и принуждает их вернуться обратно на первую ступень.

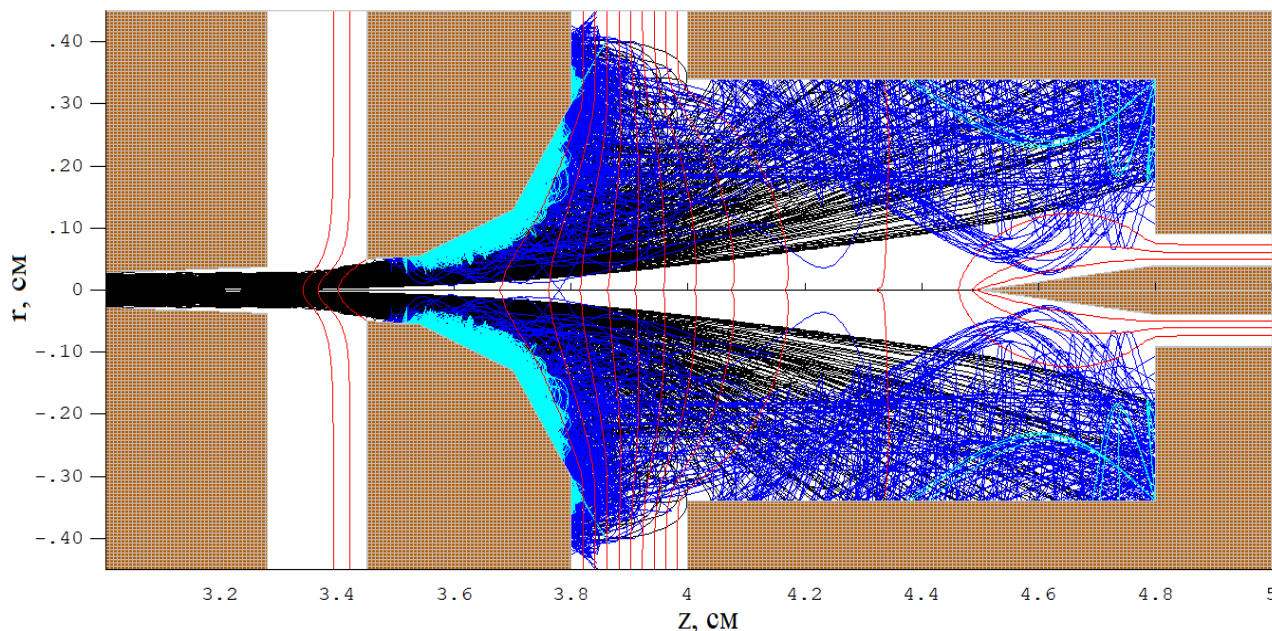


Рис. 5. Траектории первичных (черные кривые), первого поколения вторичных (синие кривые) и второго поколения вторичных (голубые кривые) электронов и эквипотенциали электрического поля в двухступенчатом коллекторе с рекуперацией в динамическом режиме.

Таблица 2. Распределение тока и мощности рекуперации по электродам коллектора.

	I/I_0 первичных.	I/I_0 с учетом вторичных	I/I_0 идеальный	$P_{рек}/P_0$ с учетом вторичных	$P_{рек}/P_0$ идеальный
Входное отверстие	0.021	0.022	0.000	0.000	0.000
1-ая ступень ($U=0.3V_0$)	0.681	0.696	0.655	0.209	0.197
2-ая ступень ($U=0.8V_0$)	0.238	0.222	0.285	0.178	0.228
Всего:	0.940	0.940	0.940	0.387	0.425
			$\eta_{рек} =$	0.634	0.696

Таким образом, в разработанной конструкции коллектора с рекуперацией за счет вторичных электронов происходит лишь незначительное перераспределение токов на электродах коллектора. Распределение полных токов (с учетом вторичных электронов) и токов первичных электронов по

электродам коллекторной системы приведено в табл.2. Там же приведено распределение тока по сегментам для случая идеальной сепарации электронов по энергиям, полученное из анализа интегрального распределения. В таблице также указаны относительные значения мощности, рекуперированной в источник питания $P_{рек}$. Как видно из таблицы, полученная эффективность рекуперации $\eta_{рек}=63\%$ всего на 7% ниже идеального значения, что свидетельствует о хороших электронно-оптических свойствах выбранной конструкции коллектора с точки зрения сепарации электронов отработанного пучка по энергиям. Таким образом, за счет использования двухступенчатого коллектора с рекуперацией полный КПД разработанного мощного КРВ миллиметрового диапазона удалось повысить с 26% до 43%.

Заключение

В результате исследований разработана конструкция двухступенчатого коллектора с пониженным потенциалом для мощного КРВ миллиметрового диапазона. Как показали численные расчеты с помощью комплекса программ PARS, конструкция обеспечивает эффективность рекуперации 73% в статическом и 63% в динамическом режимах. При этом за счет созданных в коллекторной системе электростатических полей происходит эффективная сепарация отработанных электронов по энергиям и подавление вторичной электронной эмиссии с поверхностей электродов. Величина обратного тока в систему взаимодействия в динамическом режиме составляет всего 2%.

Разработанная конструкция коллекторной системы с пониженным потенциалом позволяет уменьшить тепловую нагрузку на коллектор более чем в два раза и увеличить общий КПД разработанного КРВ с 26% до 43%.

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

Литература

1. 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
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. Электро нно-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. 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
6. 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)
7. 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

8. Сандалов А.Н., Родякин В.Е. Коллекторные системы приборов СВЧ с продольным взаимодействием // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. №9. С.63-76.

Для цитирования:

Родякин В.Е., Пикунов В.М., Аксенов В.Н. Рекуперация энергии в коллекторе мощного клистрона с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/8/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.8