

УДК 004.428; 621.385.6

## РIS-модель релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом

А. Е. Дубинов<sup>1,2</sup>, Г. Н. Колесов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саровский физико-технический институт – филиал научно-исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт» (СарФТИ НИЯУ МИФИ), г. Саров, Нижегородская обл., 607186, Россия

<sup>2</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Нижегородская обл., 607188, Россия

Предложена концепция и дизайн релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом. Создана 2.5-D компьютерная *particle-in-cell* (PIC) модель релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом на основе PIC-кода KARAT. Модель учитывает подвод внешней СВЧ-волны от задающего генератора, позволяет самосогласованно вычислять динамику электронов и выходные характеристики клистрона. Проведено сравнительное моделирование релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом и релятивистского двух-резонаторного пролетного клистрона без магнитного зеркала. Показано, что спектральные характеристики обоих клистронов близки друг другу. Выполнено сравнение выходной мощности отражательного и пролетного клистрона. Найдено, что выходная мощность у отражательного клистрона примерно в 1.4 раза больше, чем у пролетного. Изучено влияние положения магнитного зеркала на величину генерируемой СВЧ-мощности отражательного клистрона.

**Ключевые слова:** релятивистский отражательный клистрон, PIC-код, магнитное зеркало.

### Введение

Двухрезонаторный пролетный клистрон представляет собой СВЧ-осциллятор, в котором осуществляется преобразование постоянного по плотности электронного пучка в пространственно-периодический. Происходит это следующим образом. При проходе электронного пучка сквозь первый резонатор, в котором предварительно возбуждены продольные СВЧ-колебания электрического поля с помощью какого-либо внешнего источника, возникает модуляция электронов по скорости. Далее при проходе пучка сквозь длинную трубу дрейфа происходит преобразование модуляции электронного пучка по скорости в его модуляцию по плотности. В результате этого первоначально сплошной электронный пучок разбивается на периодическую последовательность электронных банчей. Эти банчи возбуждают второй резонатор, из которого выводится СВЧ-излучение. Фактически клистрон, работающий в таком режиме, является СВЧ-усилителем входного СВЧ-излучения, которым возбуждается первый резонатор. Клистрон был изобретен братьями Russell Varian и Sigurd Varian в 1939 г. [1]. Ранняя история создания первых клистронов представлена в [2].

Принцип действия клистрона, его теория и области применения рассмотрены во многих книгах (например, [3, 4]). Кроме того, клистроны также могут быть многорезонаторными [5–7] и/или многопучковыми [6, 8–10]. Развиваются также сильноточные релятивистские пролетные клистроны для

✉ А.Е. Дубинов: [dubinov-ae@yandex.ru](mailto:dubinov-ae@yandex.ru)

Поступила в редакцию: 18.01.2025

После доработки: 31.01.2025

Принята к публикации: 04.02.2025

EDN BXVVKZ

систем СВЧ-излучения большой мощности [11 – 16]. Клистроны, в основном, применяются для питания линейных ускорителей электронов [17, 18].

В многочисленном семействе клистронов известен еще один представитель – однорезонаторный отражательный клистрон [3, 4]. В нем электронный пучок проходит сквозь единственный резонатор дважды, отражаясь между этими проходами тормозящим электрическим полем, создаваемым электродом-отражателем. При этом единственный резонатор в нем одновременно выполняет две функции – модулятора электронного пучка и отбирающего СВЧ-энергию у пучка резонатора.

Известны многопучковые отражательные клистроны [19, 20]. Однако релятивистские отражательные клистроны для систем СВЧ-излучения большой мощности пока не существуют. Одна из главных причин отсутствия релятивистских отражательных клистронов заключается в том, что на отражатель необходимо подавать отрицательный потенциал больший, чем на катод. Это может привести к вакуумному пробою на электроде-отражателе.

В то же время в вакуумной сильноточной электронике известны и другие, не электростатические, способы отражения электронов, например с помощью магнитного зеркала [21–25]. Существуют многочисленные доказательства успешного применения магнитных зеркал в гиротронах [26, 27], магнетронах [28] и виркаторах [29, 30], когда повышается эффективность осцилляторов. Например, в МИФИ был разработан и создан виркатор с магнитным зеркалом для проведения лабораторных работ со студентами [31]. Однако идея отражения электронов магнитным зеркалом в отражательном клистроне ранее нигде не высказывалась. Тем не менее применение магнитного зеркала в отражательном клистроне позволит создавать как релятивистские сильноточные отражательные клистроны для систем СВЧ-излучения большой мощности, так и многорезонаторные отражательные клистроны.

Для моделирования и исследования характеристик электронных приборов СВЧ-диапазона часто используют численное моделирование. Проведение численного эксперимента является наиболее действенным и быстрым способом предсказания работоспособности и эффективности моделируемого устройства в зависимости от изменения параметров его модели по сравнению с экспериментальным исследованием. Это позволяет существенно уменьшить затраты времени на эксперименты и настройку проектируемого устройства.

При проведении численных экспериментов, связанных с физикой электронных пучков, часто используют метод крупных частиц, одной из модификаций которого является метод частиц в ячейках (в научной литературе его называют *particle-in-cell*, или сокращенно PIC-методом).

Коды, в которых используется PIC-метод, обычно устроены следующим образом [32, 33]. На каждом временном шаге вычисляются пространственные распределения компонентов векторов  $E$  и  $B$  электромагнитного поля в системе. Для чего используются сеточные методы расчета на заданной пространственной сетке. После этого вычисляются все компоненты движения (скорости, импульсы, смещения) всех частиц. Для этого используется какой-нибудь одношаговый алгоритм (например, Рунге–Кутты). После выполнения такого шага снова вычисляется электромагнитное поле с учетом движения заряженных частиц.

При моделировании аксиально-симметричных систем PIC-методом для уменьшения вычислительных затрат применяют так называемый 2.5-мерный расчет (2.5D-расчет). Под термином «2.5D-моделирование» подразумевается расчет с учетом азимутальных компонентов скорости (и/или импульсов) частиц без вычисления азимутальных смещений частиц. Таким образом, вычисляются все три компоненты скорости (импульса) частицы и только две компоненты координат частиц ( $r$  и  $z$ ) [34–36].

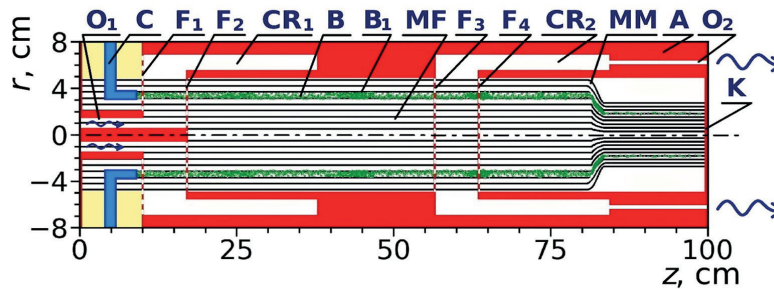
В связи с заданной проблемой (гипотезой) была поставлена цель, которая заключалась в создании 2.5-D компьютерной PIC-модели релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом, с помощью которой можно было бы:

- показать работоспособность релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом;
- установить особенности пространственной и фазовой динамики электронов в нем;
- оценить мощностные и спектральные характеристики осциллятора в сравнении с обычным двухрезонаторным пролетным клистроном.

В результате была создана PIC-модель релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитной пробкой на базе известного PIC-кода KARAT [37].

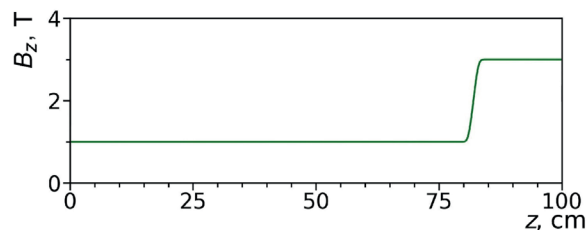
## Конфигурация отражательного клистрона, принцип действия, параметры, и выбранный код

Компьютерная модель релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона построена для конфигурации, показанной на рис. 1. Этот клистрон содержит релятивистский замагниченный диод – наилучший выбор для генерации трубчатых релятивистских электронных пучков [38]. Клистрон имеет традиционные для обычного двухрезонаторного пролетного клистрона элементы: трубчатый катод С и анодный электрод А, содержащий входную коаксиальную линию  $O_1$  (на рис. 1 слева) с волновым сопротивлением  $\rho_1 = 66$  Ом, подсоединенную к задающему генератору, выходную коаксиальную линию  $O_2$  с сопротивлением  $\rho_2 = 4.8$  Ом (на рис. 1 справа), подсоединенную к выходной антенне, два резонатора  $CR_{1,2}$ , один из которых  $CR_1$  осуществляет модуляцию электронного пучка по скорости, а другой  $CR_2$  – концентрирует выходное электромагнитное поле. Резонаторы  $CR_{1,2}$  находятся друг от друга на расстоянии, необходимом для преобразования модуляции электронного пучка по скорости в его модуляцию по плотности. Эта часть анодного электрода представляет собой цилиндрическую трубу дрейфа. Завершается тракт транспортировки электронного пучка в клистроне коллектором К (на рис. 1 справа). Резонатор  $CR_1$  отделен от магнитоизолированного диода и трубой дрейфа прозрачными для электронов фольгами  $F_{1,2}$ , а резонатор  $CR_2$  отделен от трубы дрейфа и полости коллектора фольгами  $F_{3,4}$ . Вместо фольг  $F_{1-4}$  могут быть использованы сетки из металлической проволоки. Размеры всех элементов клистрона понятны из рис. 1, на котором радиальные и осевые масштабы различны.



**Рис. 1.** Геометрия релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитной пробкой:  $O_1$  и  $O_2$  – входная и выходная коаксиальная линия; С – катод;  $F_{1-4}$  – фольга;  $CR_{1,2}$  – коаксиальные резонаторы; В – электронный пучок;  $B_1$  – электронный банчик; MF – линии индукции магнитного поля; MM – магнитное зеркало; А – анодный электрод; К – коллектор, волнистые стрелки показывают входящую СВЧ-волну задающего генератора (слева) и выходящую на антенну СВЧ-волну (справа)

Считалось, что на клистрон по всей его длине с помощью длинного соленоида наложено однородное магнитное поле с индукцией 1 Тл, а в области коллектора с помощью дополнительного соленоида магнитное поле увеличено в  $\delta$  раз, в результате чего формируется магнитное зеркало с зеркальным соотношением  $\delta$ . При  $\delta > 1$  моделируется релятивистский двухрезонаторный отражательный клистрон, а при  $\delta = 1$  отражательный клистрон трансформируется в обычный пролетный. Профиль магнитного поля вдоль оси клистрона при  $\delta = 3$  показан на рис. 2. Этот профиль магнитного поля является граничным условием,



**Рис. 2.** Профиль магнитного поля вдоль оси отражательного клистрона

с учетом которого рассчитывалось распределение магнитного поля во всей области, как решение уравнения  $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$  на заданной сетке, в том числе в области прохождения электронного пучка. В области прохождения пучка радиальная компонента магнитного поля не равна нулю, а на оси она равна нулю. Об этом свидетельствуют рассчитанные линии индукции магнитного поля, которые показаны на рис. 1.

Электрические потенциалы катода и анода в клистроне задавались постоянными по времени. В модели предусматривалась следующая последовательность физических процессов в клистроне: сначала во входную коаксиальную линию  $O_1$  запускалась синусоидальная ТЕМ-волна задающего генератора. Далее, после того как эта волна отразится от торцевой стенки резонатора  $CR_1$  и вернется назад к своему входу, в резонаторе устанавливается стоячая СВЧ-волна. Эта волна в зазоре между фольгами  $F_{1,2}$  имеет  $z$ -ю компоненту электрического поля и используется для модуляции электронного пучка по скорости.

После того как в резонаторе установится стоячая СВЧ-волна, с катода начинает эмитироваться с постоянным током трубчатый релятивистский электронный пучок с внутренним и внешним радиусами  $r_i = 3.1$  см и  $r_e = 3.65$  см, соответственно. Задавалось время задержки пуска электронного пучка относительно пуска ТЕМ-волны с задающего генератора  $\tau = 20$  нс.

Далее электронный пучок последовательно проходит диодный промежуток; промежуток между фольгами  $F_{1,2}$  резонатора  $CR_1$ , где модулируется по скорости; трубу дрейфа, где осуществляется преобразование модуляции электронного пучка по скорости в его модуляцию по плотности; промежуток между фольгами  $F_{3,4}$  резонатора  $CR_4$ , где происходит отбор энергии сгруппированного электронного пучка; коллектор, в котором пучок отражается магнитным зеркалом и направляется в обратном направлении.

В качестве примера выбраны следующие параметры для модели релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона: зеркальное соотношение  $\delta = 3$ , потенциал катода  $-178$  кВ, ток электронного пучка  $-100$  А, мощность и частота входной СВЧ-волны  $-2$  кВт и  $1$  ГГц. Моделировалась работа клистрона на протяжении  $100$  нс. Конечно, все параметры клистрона можно варьировать.

РЭС-модель релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона построена на базе релятивистского электромагнитного РЭС-кода КАРАТ [36, 37]. Код предназначен для решения нестационарных электродинамических задач, имеющих сложную геометрию и включающих динамику, в общем случае релятивистских частиц (электронов, ионов, нейтралов). Код самосогласованно решает релятивистские уравнения движения частиц и уравнения Максвелла на прямоугольной сетке с постоянным шагом. Уравнения движения частиц численно решаются с помощью традиционных одношаговых алгоритмов. Для решения уравнений Максвелла применяется конечно-разностная схема с перешагиванием на прямоугольных сетках со сдвигом на полшага. Контроль за точностью расчета ведется по точности выполнения закона сохранения полной энергии частиц и электромагнитных полей в моделируемой области. Поскольку геометрия клистрона имеет осевую симметрию, то использовался 2.5-D вариант расчета. Число узлов в расчетной сетке  $71 \times 1001$ .

Укажем, что код КАРАТ ранее многократно тестировался и использовался для моделирования вакуумно-пучковых и плазменно-пучковых приборов [29, 30, 39–44], а также газоразрядных процессов [25, 45–47].

## Динамика электронного пучка в клистроне

**Обычный двухрезонаторный пролетный клистрон.** Рассмотрим сначала динамику электронного пучка в двухрезонаторном пролетном клистроне без магнитного зеркала. В результате моделирования было определено, что электроны пучка полностью проходят вакуумную полость клистрона от катода до коллектора, двигаясь по прямолинейным траекториям вдоль линии индукции магнитного поля.

На рис. 3 показан фазовый портрет пучка в момент времени  $27$  нс. На нем видна продольная группировка электронного пучка, типичная для клистронов. Фазовый портрет дополняет мгновенное распределение линейной плотности электронов, вычисленное как интеграл электронной концентрации по поперечному сечению пучка (рис. 4). Видно, что в пучке сформированы электронные банчи, которые движутся вдоль направления движения электронов.

Характер движения банчей можно представить в виде пространственно-временной денситограммы, полученной в результате обработки таких распределений линейной плотности электронов, как на рис. 4

для интервала времени 20–100 нс с шагом 0.02 нс. Денситограмма представлена на рис. 5а, а ее фрагмент – на рис. 5б. Из денситограммы видно, что банчи двигаются строго периодически и с постоянной скоростью.

Денситограмма позволяет найти пространственный период следования банчей – 19.3 см, временной период прохождения какого-либо поперечного сечения клистрона – 1 нс, частоту – 1 ГГц, что соответствует частоте задающего генератора. Была также вычислена скорость движения банчей – 19.3 см/нс = 0.64  $c$ . Это значение показывает, что банчи двигаются со скоростью, близкой по значению со скоростью отдельных электронов при энергии 178 кэВ. Все эти данные подтверждают, что в клистроне без магнитного зеркала происходят электронные процессы, характерные для традиционных клистронов.

**Отражательный двухрезонаторный клистрон с магнитным зеркалом.** Представим результаты моделирования динамики электронного пучка в двухрезонаторном отражательном клистроне с магнитным зеркалом в области коллектора при  $\delta = 3$ . В результате моделирования было определено, что электроны пучка полностью проходят вакуумную полость клистрона от катода до зеркала, а далее часть электронов пучка проходит сквозь зеркало, а другая часть отражается от него. На рис. 6 представлены проекции мгновенного фазового портрета пучка в момент времени 27 нс. Проекция  $P_z(z)$  (см. рис. 6а) показывает сепарацию электронов магнитным зеркалом. Наличие  $P_r$ - и  $P_\phi$ -компонент импульса (см. рис. 6б,с) свидетельствует о циклотронном вращении электронов в области магнитного зеркала и после прохождения или отражения от зеркала.

Фазовый портрет дополняет мгновенное распределение линейной плотности электронов, которое представлено на рис. 7. Наблюдая за движением отдельных банчей в отражательном клистроне, можно заметить, что банчи делятся магнитным зеркалом на две части, одна из которых проходит сквозь зеркало, а другая часть отражается им. При этом длина отраженной части банчей увеличена. Денситограмма электронного пучка в отражательном клистроне и ее фрагмент показывают динамику сепарации банчей магнитным зеркалом (рис. 8). Частота следования банчей и их скорость остались такими же, как и у пролетного клистрона.

Отраженные от магнитного зеркала электроны имеют большой энергетический разброс, который связан с модуляцией электронов пучка по скорости, посредством электрического поля внешней электромагнитной волны в первом резонаторе.

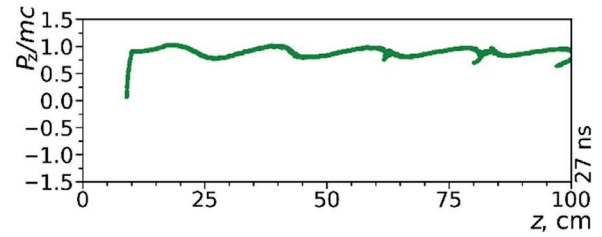


Рис. 3. Мгновенный фазовый портрет электронного пучка в пролетном клистроне

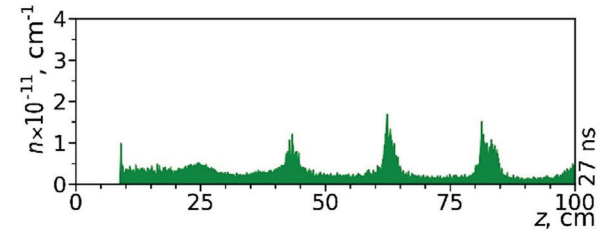


Рис. 4. Мгновенное распределение линейной плотности электронов в пролетном клистроне

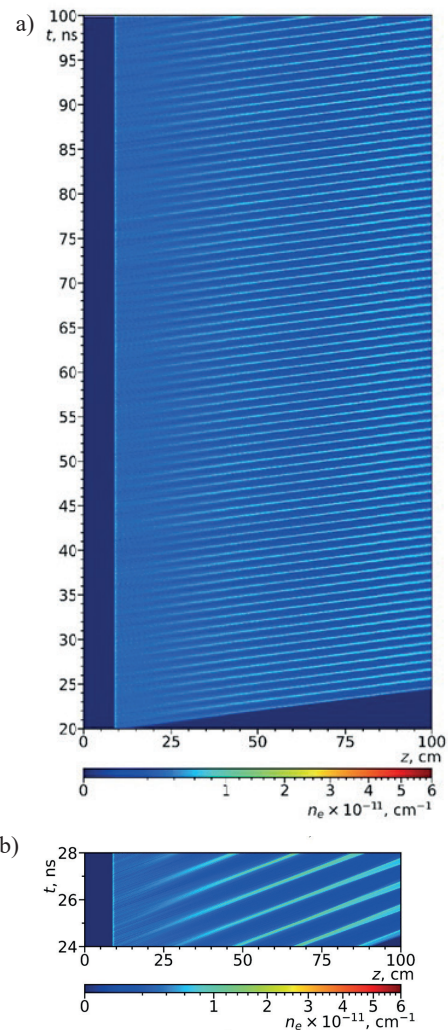
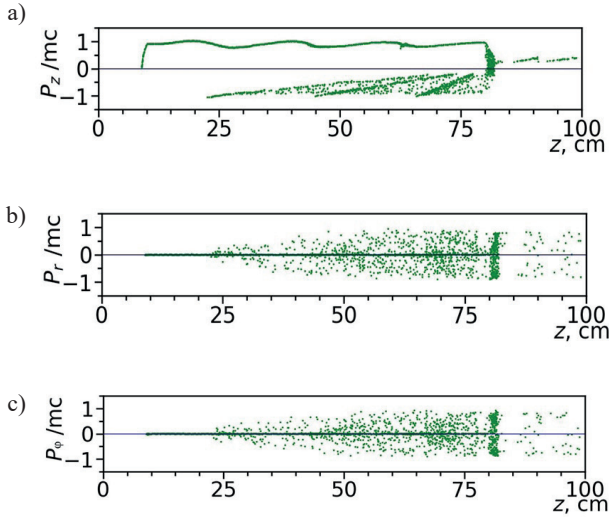
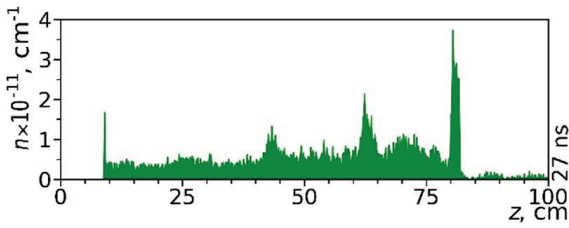


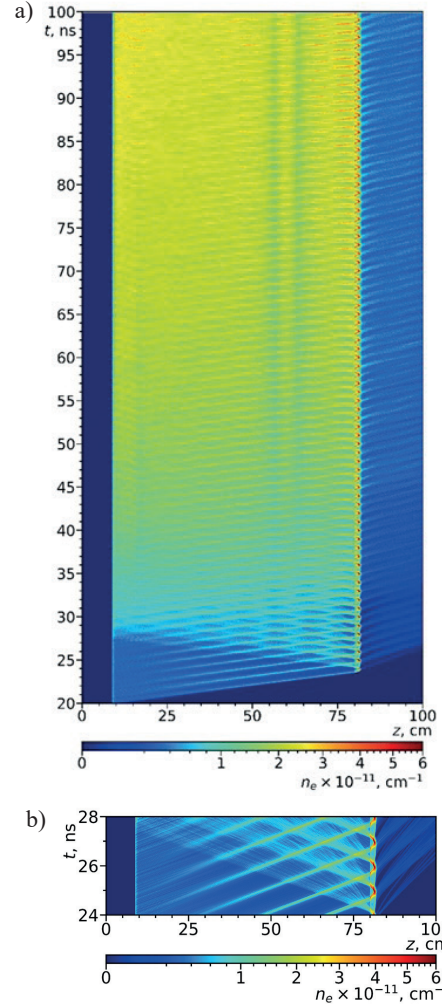
Рис. 5. Денситограмма электронного пучка в пролетном клистроне: а – полная денситограмма; б – ее фрагмент



**Рис. 6.** Мгновенные фазовые портреты  $P_z$ ,  $P_r$  и  $P_\phi$  компонент импульса пучковых электронов в отражательном клистроне с магнитным зеркалом: а)  $P_z$ ; б)  $P_r$ ; в)  $P_\phi$

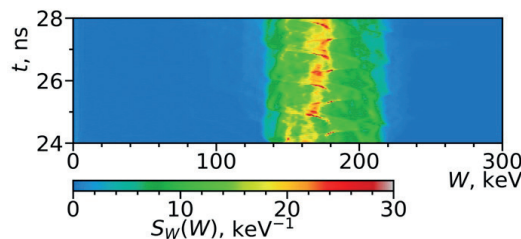


**Рис. 7.** Мгновенное распределение линейной плотности электронов в отражательном клистроне с магнитным зеркалом



**Рис. 8.** Денситограмма электронного пучка в отражательном клистроне: а – полная денситограмма; б – ее фрагмент

наторе. Этот разброс хорошо виден на рис. 6а. Для его оценки вычислялись и анализировались энергетические спектры электронов  $S_W(W)$  во всей расчетной области клистрона в различные моменты времени с шагом расчета 0,02 ns (конечно же, с учетом отраженных электронов). Если объединить все такие спектры, то можно получить энергетическую спектрограмму, показывающую эволюцию энергетического спектра электронов во времени. На рис. 9 представлена спектрограмма электронов в интервале времени от 24 до 28 нс. Этот временной интервал, во-первых, охватывает четыре периода колебаний электрического поля в первом резонаторе; во-вторых, содержит момент времени 27 нс, для которого были построены вышеприведенные фазовые портреты пучка. Поскольку амплитуда колебаний электрического поля в первом резонаторе постоянна, то и энергетическая спектрограмма имеет квазистационарную ширину от 140 до 220 кэВ.



**Рис. 9.** Фрагмент энергетической спектрограммы электронов

## Сравнение выходных СВЧ-характеристик пролетного и отражательного клистронов

**Сравнение спектральных характеристик пролетного и отражательного клистронов.** Для установления спектральных характеристик СВЧ-полей, генерируемых различными приборами, обычно вычисляются фурье-спектры колебаний тока [40, 41] или одной из компонент электромагнитной волны в выходном волноводе [48]. Для рассматриваемых здесь клистронов удобнее вычислять  $E_r(t)$  компоненту электрического поля СВЧ-волны в волноводе  $O_2$  в сечении с координатой  $z = 95$  см, а затем ее Фурье-спектр.

На рис. 10 представлены спектры СВЧ-генерации пролетного и отражательного клистронов соответственно. На обоих рисунках видно, что основная частота клистронов совпадает с частотой входной СВЧ-волны 1 ГГц и с частотой следования банчей. Этот факт убеждает нас в том, что рассматриваемые осцилляторы работают в режиме клистронов.

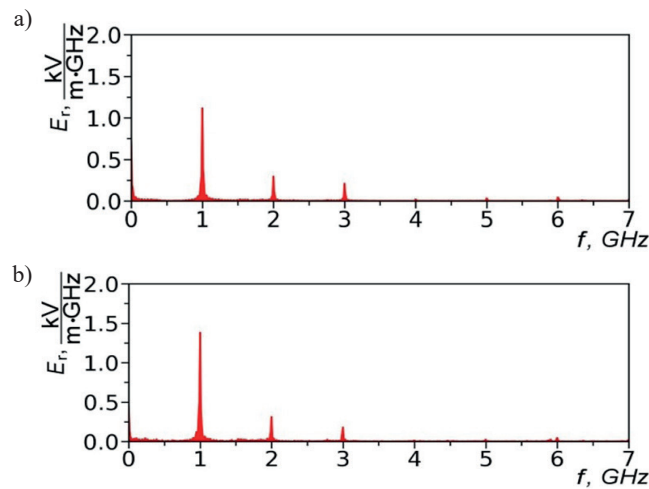
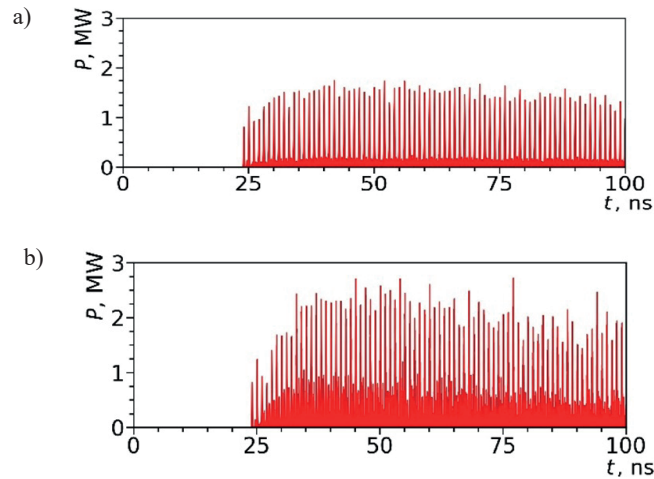


Рис 10. СВЧ-спектры генерации в осцилляторах: а – пролетный клистрон; б – отражательный клистрон

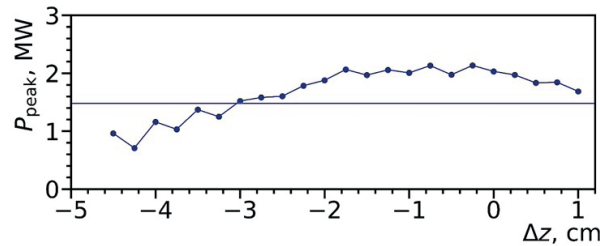
На спектрах также заметны высшие гармоники в СВЧ-волне. Причем уровень основной гармоники у отражательного клистрона немного выше, чем у пролетного клистрона, в то время как уровни высших гармоник, наоборот, у пролетного клистрона больше, чем у отражательного клистрона. Этот факт указывает на то, что эффективность отражательного клистрона на основной частоте выше, чем у пролетного клистрона.

**Сравнение мощностных характеристик пролетного и отражательного клистронов.** Для нахождения мощностных характеристик клистронов, как и для вычисления мощности в СВЧ-осцилляторах другого типа в [30, 39, 48], вычислялся поток вектора Пойнтинга вблизи открытого торца коаксиального волновода  $O_2$  в сечении с координатой  $z = 95$  см. Рассчитанный временной ход этого потока для пролетного и отражательного клистронов представлен на рис. 11, соответственно. В обоих случаях зависимости потока вектора Пойнтинга от времени имеют пиковый характер. Из них также следует, что выходная мощность у отражательного клистрона примерно в 1.4 раза больше, чем у пролетного клистрона. Это доказывает не только работоспособность, но и эффективность предложенного здесь отражательного клистрона.

**Зависимость мощностных характеристик отражательного клистрона от расположения магнитного зеркала.** Созданная 2.5-D компьютерная РІС-модель релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом позволяет проводить его оптимизацию и исследование. В качестве примера приведем результаты исследований, в которых определялось влияние положения магнитного зеркала на выходную мощность клистрона. Была проведена серия расчетов с различным положением магнитного зеркала, в каждом из которых вычислялся поток вектора Пойнтинга вблизи открытого торца коаксиального волновода  $O_2$  в сечении с координатой  $z = 95$  см. На рис. 12 представлен график зависимости среднего значения амплитуд пиков от величины смещения магнитного зеркала



**Рис. 11.** Временной ход потока вектора Пойнтинга в выходных волноводах осцилляторов: а) – пролетный клистрон; б) – отражательный клистрон



**Рис. 12.** Зависимость средней амплитуды пиков потока вектора Пойнтинга в выходном волноводе отражательного клистрона от расположения (смещения) магнитного зеркала (вдоль оси  $z$ ). Горизонтальной линией показан уровень средней амплитуды пиков для пролетного клистрона без магнитного зеркала

от начального положения, при котором  $\Delta z = 0$ , т.е. положения магнитного зеркала, при котором рост магнитного поля начинался в сечении  $z = 80$  см, а заканчивался в сечении  $z = 82$  см. При варьировании координаты начала и конца магнитного зеркала одновременно смещались на величину  $\Delta z$ . График рассчитанной зависимости имеет характерный максимум шириной, примерно равной продольной длине прямых банчей.

## Заключение

В работе предложена концепция и дизайн двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом. Предложенная концепция впервые позволила рассматривать реализуемую схему релятивистского отражательного клистрона с несколькими резонаторами. Ранее отражательные клистроны с релятивистской энергией электронов, а также отражательные клистроны с несколькими резонаторами нигде не рассматривались. Создана 2.5D-PIC модель релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом на основе PIC-кода KARAT. Модель учитывает подвод внешней СВЧ-волны от задающего генератора, позволяет самосогласованно вычислять динамику электронов и выходные характеристики клистрона. Модель и ее компьютерная реализация позволяют оперативно изменять параметры отражательного клистрона для исследовательских целей.

Преимущество предложенного релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом заключается в увеличении его выходной мощности по сравнению с пролетным клистроном при одинаковых параметрах электронных пучков и мощности задающего генератора. Увеличение выходной мощности связано, прежде всего, с дополнительным отбором энергии у отраженных от магнитного зеркала банчей.

Проведено сравнительное моделирование релятивистского двухрезонаторного отражательного клистрона с магнитным зеркалом и релятивистского двухрезонаторного пролетного клистрона без магнитного зеркала. Показано, что спектральные характеристики обоих клистронов близки друг другу. Выполнено сравнение выходной мощности отражательного клистрона и пролетного клистрона. Найдено, что выходная мощность у отражательного клистрона примерно в 1.4 раза больше, чем у пролетного клистрона.

Изучено влияние положения магнитного зеркала на величину генерируемой СВЧ-мощности отражательного клистрона.

#### **Финансирование**

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

#### **Вклад авторов**

*Дубинов А.Е.* – формулировка идеи и целей исследования; постановка задачи; выбор методов исследования; разработка концепции исследования; разработка математической модели; подбор литературных источников; редактирование текста статьи; анализ данных численного моделирования; обсуждение результатов; подготовка заключения.

*Колесов Г.Н.* – проведение численных расчетов; анализ данных численного моделирования; оптимизация параметров модели; обработка результатов; редактирование текста статьи; обсуждение результатов; подготовка заключения.

#### **Конфликт интересов**

Конфликт интересов отсутствует.

#### **Список литературы**

1. *Varian R., Varian S.F.* A high frequency oscillator and amplifier // *Journal of Applied Physics*, 1939. V. 10. P. 321–327. <https://doi.org/10.1063/1.1707311>.
2. *Caryotakis G.* The klystron: A microwave source of surprising range and endurance // *Physics of Plasmas*, 1998. V. 5. P. 1590–1598. <https://doi.org/10.1063/1.872826>.
3. *Tsimring S.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. 573 p.
4. *Gilmour A.S.* Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons. Boston & London: Artech House, 2011.
5. *Nguyen K.T., Abe D.K., Pershing D.E., Levush B., Wright E.L., Bohlen H., etc.* High-power four-cavity S-band multiple-beam klystron design // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004. V. 32, P. 1119–1135. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.828884>.
6. *Cai J. C., Syratcev I., Burt G.* Design study of a high-power Ka-band high-order-mode multibeam klystron // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020. V. 67. P. 5736–5742. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3028348>.
7. *Behtouei M., Spataro B., Di Paolo F., Leggieri A.* The Ka-band high power klystron amplifier design program of INFN // *Vacuum*, 2021. V. 191, 110377-1–6. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110377>.
8. *Boyd M. R., Dehn R. A., Hickey J. S., Mihran T. G.* The multiple-beam klystron. // *IRE Transactions on Electron Devices*, 1962. V. 9, P. 247–252. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1962.14979>.
9. *Korolyov A.N., Gelvich E.A., Zhary Y.V., Zakurdayev A.D., Poognin V.I.* Multiple-beam klystron amplifiers: performance parameters and development trends // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004. V. 32. P. 1109–1118. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.828807>.
10. *Ding Y., Zhu Y., Yin X., Sun X., Shen B., Miao Y., Wang C.* Research progress on C-band broadband multibeam klystron // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007. V. 54. P. 624–631. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.892354>.
11. *Lau Y.Y., Friedman M., Krall J., Serlin V.* Relativistic klystron amplifiers driven by modulated intense relativistic electron beams // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1990. V. 18. P. 553–569. <https://doi.org/10.1109/27.55927>.
12. *Serlin V., Friedman M.* Development and optimization of the relativistic klystron amplifier // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1994. V. 22. P. 692–700. <https://doi.org/10.1109/27.338284>.
13. *Levine J.S., Harteneck B.D.* Repetitively pulsed relativistic klystron amplifier // *Applied Physics Letters*, 1994. V. 65. P. 2133–2135. <https://doi.org/10.1063/1.112813>.

14. Huang H., Feng D.C., Luo G.Y., Lei L.Y., Chen Zh.G., Liao Y., Tan J., Jin X., Meng F.B. Repetitive operation of an S-band 1-GW relativistic klystron amplifier // IEEE Transactions on Plasma Science, 2007. V. 35. P. 384–387. <https://doi.org/10.1109/TPS.2007.893263>.
15. Yang F., Dang F., Ge X., He J., Ju J., Zhang X. A compact coaxial relativistic klystron amplifier with three cascaded single-gap bunching cavities for efficient output // Physics of Plasmas, 2022. V.29. 093111-1–7. <https://doi.org/10.1063/5.0109774>.
16. Benford J. History and future of high power microwaves // IEEE Transactions on Plasma Science, 2024. V. 52. P. 1137–1144. <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3391732>.
17. Allen M.A., Boyd J.K., Callin R.S., Deruyter H., Eppley K.R., Fant K.S., Fowkes W.R., etc. High-gradient electron accelerator powered by a relativistic klystron // Physical Review Letters, 1989. V. 63. P. 2472–2475. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.2337>.
18. Wang S., Fukuda S., Lu Z., Nisa Z., Zhou Z., Xiao O., Pei G. Design study and modeling of multi-beam klystron for Circular Electron Positron Collider // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 2022. V.1026. 166208-1–9. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166208>.
19. Jang K.-H., Jeon S.-G., Kim J.-I., Won J.-H., So J.-K., Bak S.-H., Srivastava A., Jung S.-S., Park G.-S. High order mode oscillation in a terahertz photonic-band-gap multibeam reflex klystron // Applied Physics Letters, 2008. V. 93. 211104-1–3. <https://doi.org/10.1063/1.3037026>.
20. Jang K.-H., Park S. H., Lee K., Park G.-S., Jeong Y.U. High-order photonic bandgap reflex klystron using carbon nanotube multi-beam cathode // Electronics Letters, 2012. V. 48. P. 707–708. <https://doi.org/10.1049/el.2012.0976>.
21. Gillespie K.M., Speirs D.C., Ronald K., McConville S.L., Phelps A.D.R., Bingham R., Cross A.W., Robertson C.W., Whyte C.G., He W., Vorgul I., Cairns R.A., Kellett B.J. 3D PiC code simulations for a laboratory experimental investigation of Auroral kilometric radiation mechanisms // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2008. V. 50. 124038-1–11. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/50/12/124038>.
22. Higaki H., Sakurai S., Ito K., Okamoto H. Nonneutral electron plasmas confined in a compact magnetic mirror trap // Applied Physics Express, 2012. V.5. 106001-1–3. <https://doi.org/10.1143/APEX.5.106001>.
23. Leopold J.G., Krasik Ya.E., Bliokh Y.P., Schamiloglu E. Producing a magnetized low energy, high electron charge density state using a split cathode // Physics of Plasmas, 2020. V. 27. 103102-1–9. <https://doi.org/10.1063/5.0022115>.
24. Timofeev I.V., Annenkov V.V., Volchok E.P., Glinskiy V.V. Electron beam–plasma discharge in GDT mirror trap: particle-in-cell simulations// Nuclear Fusion, 2022. V.62, 066033. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac3cdc>.
25. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. Particle-in-cell/Monte Carlo-simulation of the discharge in helium initiated by a relativistic electron beam in the chamber with a magnetic mirror // Contributions to Plasma Physics, 2022. V. 62. 202100198-1–13. <https://doi.org/10.1002/ctpp.202100198>.
26. Borzenkov D.V., Luksha O.I. Numerical simulation of space-charge dynamics in a gyrotron trap // Technical Physics, 1997. V.42. P. 1071–1074. <https://doi.org/10.1134/1.1258768>.
27. Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Manuilov V.N., Shevchenko A.S. Experiments on the formation of an intense helical electron beam under conditions of picking-up of the electrons reflected from the magnetic mirror // Radiophysics and Quantum Electronics, 2007. V.50. P. 713–719. <https://doi.org/10.1007/s11141-007-0062-4>.
28. Fuks M.I., Schamiloglu E. Application of a magnetic mirror to increase total efficiency in relativistic magnetrons // Physical Review Letters, 2019. V. 122. 224801-1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.224801>.
29. Dubinov A.E. Features of electron dynamics in a vircator with a magnetic mirror// Journal of Communications Technology and Electronics, 2000. V. 45. P. 792–796. <https://elibrary.ru/item.asp?id=14996670>.
30. Dubinov A.E., Kolesov H.N., Tarakanov V.P. Relativistic multivircator with two magnetic mirrors on underlimit electron beam: concept and PIC-simulation results // IEEE Transactions on Plasma Science, 2022. V. 50. P. 4589–4595. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3214995>.
31. Гаркуша О.В., Зданович А.И., Школьников Э.Я. СВЧ-генератор на виртуальном катоде в магнитной пробке // Сб. Науч. Тр.: Научная Сессия МИФИ, 2001, Т.7. С. 146–147.
32. Березин Ю.А., Вишневков В.А. Метод частиц в динамике разреженной плазмы. Новосибирск: Наука, 1980. 95 с.
33. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989. 452 с.
34. Skjæraasen O., Melatos A., Spitkovsky A. Particle-in cell simulations of a nonlinear transverse electromagnetic wave in a pulsar wind termination shock // Astrophysical Journal, 2005. V. 634. P. 542–546. <https://doi.org/10.1086/496873>.
35. Lee S.-Y., Lee† E., Kim K.-H., Seon J., Lee D.-H., Ryu K.-S. Development and test of 2.5-dimensional electromagnetic PIC simulation code // Journal of Astronomy and Space Sciences, 2015. V. 32. P. 45–50. <https://doi.org/10.5140/JASS.2015.32.1.45>.
36. Rozental R.M., Tai E.M., Tarakanov V.P., Fokin A.P. Using the 2.5-dimensional PIC code for simulating gyrotrons with nonsymmetric operating modes // Radiophysics and Quantum Electronics, 2022. V. 65. P. 384–396. <https://doi.org/10.1007/s11141-023-10221-7>.
37. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates, 1992.
38. Friedman M., Ury M. Microsecond duration intense relativistic electron beams // Review of Scientific Instruments, 1972. V. 43. P. 1659–1661. <https://doi.org/10.1063/1.1685517>.
39. Donets E.D., Donets E.E., Syresin E.M., Dubinov A.E., Makarov I.V., Sadovoy S.A., Saikov S.K., Tarakanov V.P. Formation of longitudinal nonlinear structures in the electron cloud of an electron-string ion source // Plasma Physics Reports, 2009. V. 35. P. 54–61. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09010073>.

40. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. PIC simulation of the dynamics of electrons in a conical vircator // IEEE Transactions on Plasma Science, 2016. V. 44. P.1391 – 1395. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2580608>.
41. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. PIC simulation of a two-foil vircator // Laser and Particle Beam, 2017. V. 35. P. 362 – 365. <https://doi.org/10.1017/S0263034617000283>.
42. Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Fedotov A.E., Zotova I.V., Tarakanov V.P. Generation of rogue waves in gyrotrons operating in the regime of developed turbulence // Physical Review Letters, 2017. V. 119. 034801-1 – 6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.034801>
43. Totmeninov E.M., Klimov A.I., Konev V.Yu., Pegel I.V., Rostov V.V., Tsygankov R.V., Tarakanov V.P. Mode selection in an S-band relativistic backward wave oscillator based on a coaxial waveguide // Technical Physics Letters, 2014. V. 40. P. 152 – 156. <https://doi.org/10.1134/S1063785014020278>.
44. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. Simulation of the formation of the squeezed state of an electron beam with a sublimiting beam current in a closed drift tube // Technical Physics, 2020. V. 65. P. 1002 – 1005. <https://doi.org/10.1134/S1063784220060080>.
45. Dubinov A.E. The simulation of a beam-plasma discharge with the beam current exceeding the limiting vacuum current // High Temper, 2004. V. 42. P. 675 – 681. <https://doi.org/10.1023/B:HITE.0000046520.56858.b9>.
46. Barabanov V.N., Dubinov A.E., Loiko M.V., Saikov S.K., Selemir V.D., Tarakanov V.P. Beam discharge excited by distributed virtual cathode // Plasma Physics Reports, 2012. V. 38. P. 169 – 178. <https://doi.org/10.1134/S1063780X12010023>.
47. Kralkina E.A., Nekhudova P.A., Nikonov A.M., Vavilin K.V., Zadiriev I.I. Mutual influence of the channels in a combined discharge based on the RF inductive and DC discharges // Vacuum, 2022. V. 198. 110873-1 – 11. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.110873>.
48. Mumtaz S., Lim J.S., Ghimire B., Lee S.W., Choi J.J., Choi E.H. Enhancing the power of high power microwaves by using zone plate and investigations for the position of virtual cathode inside the drift tube // Physics of Plasmas, 2018. V. 25. 103113-1 – 9. <https://doi.org/10.1063/1.5043595>.

---

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 1, pp. 3 – 15

---

## PIC-model of relativistic two-cavity reflex klystron with magnetic mirror

A. E. Dubinov<sup>1,2,✉</sup> H. N. Kolesov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Sarov Institute of Physics and Technology – Branch of National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute» (SarFTI–NRNU MEPhI), 6 Dukhova St., Sarov, Nizhny Novgorod region, 607186, Russia

<sup>2</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific and Research Institute of Experimental Physics (RFNC–VNIIEF), 37 Mira Ave., Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia

✉ dubinov-ae@yandex.ru

Received January 18, 2025; revised January 31, 2025; accepted February 04, 2025

The concept and design of a relativistic two-cavity reflex klystron with a magnetic mirror is proposed. A 2.5-D computer particle-in-cell (PIC) model of a relativistic two-cavity reflex klystron with magnetic mirror based on the KARAT PIC code was created. The model takes into account the input of an external microwave from the master oscillator, allows self-consistent calculation of the electron dynamics and output characteristic of the klystron. Comparative simulation of relativistic two-cavity reflex klystron with magnetic mirror and relativistic two-cavity transit klystron without magnetic mirror was carried out. It was been shown that the spectral characteristics of both klystrons are close. The output power of the reflex klystron and the transit klystron are compared. It was found that the output power of the reflex klystron is about 1.4 times more that of the transit klystron. The influence of magnetic mirror position on the value of the generated microwave power of the reflex klystron has been studied.

**Keywords:** relativistic two-cavity reflex klystron, PIC code, magnetic mirror.

## References

1. Varian R., Varian S.F. A high frequency oscillator and amplifier. *Journal of Applied Physics*, 1939, vol. 10, pp. 321–327. <https://doi.org/10.1063/1.1707311>.
2. Caryotakis G. The klystron: A microwave source of surprising range and endurance. *Physics of Plasmas*, 1998, vol. 5, pp. 1590–1598. <https://doi.org/10.1063/1.872826>.
3. Tsimring S.E. *Electron beams and microwave vacuum electronics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. 573 p.
4. Gilmour A.S. *Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons*. Boston & London: Artech House, 2011.
5. Nguyen K.T., Abe D.K., Pershing D.E., Levush B., Wright E.L., Bohlen H., etc. High-power four-cavity S-band multiple-beam klystron design. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, vol. 32, pp. 1119–1135. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.828884>.
6. Cai J.C., Syratcev I., Burt G. Design study of a high-power Ka-band high-order-mode multibeam klystron. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, pp. 5736–5742. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3028348>.
7. Behtouei M., Spataro B., Di Paolo F., Leggieri A. The Ka-band high power klystron amplifier design program of INFN. *Vacuum*, 2021, vol. 191, 110377-1–6. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110377>.
8. Boyd M.R., Dehn R.A., Hickey J.S., Mihran T.G. The multiple-beam klystron. *IRE Transactions on Electron Devices*, 1962, vol. 9, pp. 247–252. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1962.14979>.
9. Korolyov A.N., Gelvich E.A., Zhary Y.V., Zakurdayev A.D., Poognin V.I. Multiple-beam klystron amplifiers: performance parameters and development trends. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, vol. 32, pp. 1109–1118. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.828807>.
10. Ding Y., Zhu Y., Yin X., Sun X., Shen B., Miao Y., Wang C. Research progress on C-band broadband multibeam klystron. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, vol. 54, pp. 624–631. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.892354>.
11. Lau Y.Y., Friedman M., Krall J., Serlin V. Relativistic klystron amplifiers driven by modulated intense relativistic electron beams. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1990, vol. 18, pp. 553–569. <https://doi.org/10.1109/27.55927>.
12. Serlin V., Friedman M. Development and optimization of the relativistic klystron amplifier. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1994, vol. 22, pp. 692–700. <https://doi.org/10.1109/27.338284>.
13. Levine J.S., Harteneck B.D. Repetitively pulsed relativistic klystron amplifier. *Applied Physics Letters*, 1994, vol. 65, pp. 2133–2135. <https://doi.org/10.1063/1.112813>.
14. Huang H., Feng D.C., Luo G.Y., Lei L.Y., Chen Zh. G., Liao Y., Tan J., Jin X., Meng F.B. Repetitive operation of an S-band 1-GW relativistic klystron amplifier. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, vol. 35, pp. 384–387. <https://doi.org/10.1109/TPS.2007.893263>.
15. Yang F., Dang F., Ge X., He J., Ju J., Zhang X. A compact coaxial relativistic klystron amplifier with three cascaded single-gap bunching cavities for efficient output. *Physics of Plasmas*, 2022, vol. 29, 093111-1–7. <https://doi.org/10.1063/5.0109774>.
16. Benford J. History and future of high power microwaves. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2024, vol. 52, pp. 1137–1144. <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3391732>.
17. Allen M.A., Boyd J.K., Callin R.S., Deruyter H., Eppey K.R., Fant K.S., Fowkes W.R., etc. High-gradient electron accelerator powered by a relativistic klystron. *Physical Review Letters*, 1989, vol. 63, pp. 2472–2475. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.2337>.
18. Wang S., Fukuda S., Lu Z., Nisa Z., Zhou Z., Xiao O., Pei G. Design study and modeling of multi-beam klystron for Circular Electron Positron Collider. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 2022, vol. 1026, 166208-1–9. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166208>.
19. Jang K.-H., Jeon S.-G., Kim J.-I., Won J.-H., So J.-K., Bak S.-H., Srivastava A., Jung S.-S., Park G.-S. High order mode oscillation in a terahertz photonic-band-gap multibeam reflex klystron. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, p211104-1–3. <https://doi.org/10.1063/1.3037026>.
20. Jang K.-H., Park S.H., Lee K., Park G.-S., Jeong Y.U. High-order photonic bandgap reflex klystron using carbon nanotube multi-beam cathode. *Electronics Letters*, 2012, vol. 48, pp. 707–708. <https://doi.org/10.1049/el.2012.0976>.
21. Gillespie K.M., Speirs D.C., Ronald K., McConville S.L., Phelps A.D.R., Bingham R., Cross A.W., Robertson C.W., Whyte C.G., He W., Vorgul I., Cairns R.A., Kellett B.J. 3D PiC code simulations for a laboratory experimental investigation of Auroral kilometric radiation mechanisms. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2008, vol. 50, 124038-1–11. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/50/12/124038>.
22. Higaki H., Sakurai S., Ito K., Okamoto H. Nonneutral electron plasmas confined in a compact magnetic mirror trap. *Applied Physics Express*, 2012, vol. 5, 106001-1–3. <https://doi.org/10.1143/APEX.5.106001>.
23. Leopold J.G., Krasik Ya. E., Bliokh Y.P., Schamiloglu E. Producing a magnetized low energy, high electron charge density state using a split cathode. *Physics of Plasmas*, 2020, vol. 27, 103102-1–9. <https://doi.org/10.1063/5.0022115>.
24. Timofeev I.V., Annenkov V.V., Volchok E.P., Glinskiy V.V. Electron beam-plasma discharge in GDT mirror trap: particle-in-cell simulations. *Nuclear Fusion*, 2022, vol. 62, 066033. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac3cdc>.
25. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. Particle-in-cell/Monte Carlo-simulation of the discharge in helium initiated by a relativistic electron beam in the chamber with a magnetic mirror. *Contributions to Plasma Physics*, 2022, vol. 62, 202100198-1–13. <https://doi.org/10.1002/ctpp.202100198>.

26. Borzenkov D.V., Luksha O.I. Numerical simulation of space-charge dynamics in a gyrotron trap. *Technical Physics*, 1997, vol. 42, pp. 1071–1074. <https://doi.org/10.1134/1.1258768>.
27. Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Manuilov V.N., Shevchenko A.S. Experiments on the formation of an intense helical electron beam under conditions of picking-up of the electrons reflected from the magnetic mirror. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2007, vol. 50, pp. 713–719. <https://doi.org/10.1007/s11141-007-0062-4>.
28. Fuks M.I., Schamiloglu E. Application of a magnetic mirror to increase total efficiency in relativistic magnetrons. *Physical Review Letters*, 2019, vol. 122, 224801-1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.224801>.
29. Dubinov A.E. Features of electron dynamics in a vircator with a magnetic mirror// *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2000, vol. 45, pp. 792–796. <https://elibrary.ru/item.asp?id=14996670>.
30. Dubinov A.E., Kolesov H.N., Tarakanov V.P. Relativistic multivircator with two magnetic mirrors on underlimit electron beam: concept and PIC-simulation results. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, vol. 50, pp. 4589–4595. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3214995>.
31. Garkusha O.V., Zdanovich A.I., Shkol'nikov E.Ya. SVCH-generator na virtual'nom katode v magnitnoj probke [Microwave generator on a virtual cathode in a magnetic plug]. *Sb. Nauch. Tr.: Nauchnaya Sessiya MIFI [Sat. Scientific Proceedings: Scientific Session MEFH]*, 2001, vol. 7, pp. 146–147.
32. Berezin YU. A., Vshivkov V. A. Metod chastic v dinamike razrezhennoj plazme [Particle method in rarefied plasma dynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 95 p.
33. Bedsel CH., Lengdon A. *Fizika plazmy i chislennoe modelirovanie*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 452 p.
34. Skjæraasen O., Melatos A., Spitkovsky A. Particle-in cell simulations of a nonlinear transverse electromagnetic wave in a pulsar wind termination shock. *Astrophysical Journal*, 2005, vol. 634, pp. 542–546. <https://doi.org/10.1086/496873>.
35. Lee S.-Y., Lee† E., Kim K.-H., Seon J., Lee D.-H., Ryu K.-S. Development and test of 2.5-dimensional electromagnetic PIC simulation code. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2015, vol. 32, pp. 45–50. <https://doi.org/10.5140/JASS.2015.32.1.45>.
36. Rozental R.M., Tai E.M., Tarakanov V.P., Fokin A.P. Using the 2.5-dimensional PIC code for simulating gyrotrons with nonsymmetric operating modes. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2022, vol. 65, pp. 384–396. <https://doi.org/10.1007/s11141-023-10221-7>.
37. Tarakanov V.P. *User's Manual for Code KARAT*. Springfield, VA: Berkley Research Associates, 1992.
38. Friedman M., Ury M. Microsecond duration intense relativistic electron beams. *Review of Scientific Instruments*, 1972, vol. 43, pp. 1659–1661. <https://doi.org/10.1063/1.1685517>.
39. Donets E.D., Donets E.E., Syresin E.M., Dubinov A.E., Makarov I.V., Sadovoy S.A., Saikov S.K., Tarakanov V.P. Formation of longitudinal nonlinear structures in the electron cloud of an electron-string ion source. *Plasma Physics Reports*, 2009, vol. 35, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09010073>.
40. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. PIC simulation of the dynamics of electrons in a conical vircator. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44, pp. 1391–1395. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2580608>.
41. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. PIC simulation of a two-foil vircator. *Laser and Particle Beam*, 2017, vol. 35, pp. 362–365. <https://doi.org/10.1017/S0263034617000283>.
42. Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Fedotov A.E., Zotova I.V., Tarakanov V.P. Generation of rogue waves in gyrotrons operating in the regime of developed turbulence. *Physical Review Letters*, 2017, vol. 119, 034801-1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.034801>.
43. Totmeninov E.M., Klimov A.I., Konev V.Yu., Pegel I.V., Rostov V.V., Tsygankov R.V., Tarakanov V.P. Mode selection in an S-band relativistic backward wave oscillator based on a coaxial waveguide. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, pp. 152–156. <https://doi.org/10.1134/S1063785014020278>.
44. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. Simulation of the formation of the squeezed state of an electron beam with a sub-limiting beam current in a closed drift tube. *Technical Physics*, 2020, vol. 65, pp. 1002–1005. <https://doi.org/10.1134/S1063784220060080>.
45. Dubinov A.E. The simulation of a beam-plasma discharge with the beam current exceeding the limiting vacuum current. *High Temper.*, 2004, vol. 42, pp.675–681. <https://doi.org/10.1023/B:HITE.0000046520.56858.b9>
46. Barabanov V.N., Dubinov A.E., Loiko M.V., Saikov S.K., Selemir V.D., Tarakanov V.P. Beam discharge excited by distributed virtual cathode. *Plasma Physics Reports*, 2012, vol. 38, pp. 169–178. <https://doi.org/10.1134/S1063780X12010023>.
47. Kralkina E.A., Nekhudova P.A., Nikonov A.M., Vavilin K.V., Zadiriev I.I. Mutual influence of the channels in a combined discharge based on the RF inductive and DC discharges. *Vacuum*, 2022, vol. 198, 110873-1–11. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.110873>.
48. Mumtaz S., Lim J.S., Ghimire B., Lee S.W., Choi J.J., Choi E.H. Enhancing the power of high power microwaves by using zone plate and investigations for the position of virtual cathode inside the drift tube. *Physics of Plasmas*, 2018, vol. 25, 103113-1–9. <https://doi.org/10.1063/1.5043595>.