

Об электронно-волновом взаимодействии в мощном многолучевом клистроне с радиальным расположением лучей

Н.А. Голованов, А.В. Галдецкий

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: на основе теоретического анализа и трёхмерного моделирования рассмотрена новая конструкция многолучевого клистрона с кольцевыми резонаторами, в которой парциальные электронные лучи эмитируются индивидуальными пушками и движутся по радиусам к общему центру. Показано, что в сверхразмерных кольцевых резонаторах клистрона, работающих на моде H_{002} , удаётся провести селекцию типов колебаний. Представлены результаты расчёта многолучевого клистрона S-диапазона с 72 парциальными электронными лучами с током 11.2 А на луч, ускоряющим напряжением 58 кВ, выходной мощностью 26 МВт, КПД 57%.

Ключевые слова: сверхмощный многолучевой клистрон, кольцевые резонаторы, селекция типов колебаний резонатора

1. Введение

Успехи твердотельных технологий приводят к тому, что в сантиметровом диапазоне вакуумные приборы средней и малой мощности постепенно вытесняются из радиолокации и связи. По-видимому, востребованными останутся только миллиметровые приборы и сверхмощные лампы.

Современные сверхмощные клистроны применяются в ускорителях научного и медицинского назначения, радарх и других устройствах. Одна из главных задач в разработке таких приборов – достижение высокой выходной мощности при ограниченном напряжении питания. Она решается путём увеличения числа лучей и их тока, а также повышением эффективности взаимодействия электронного потока с полями резонаторной системы [1], но на этом пути имеются принципиальные ограничения. В традиционных многолучевых клистроны с параллельными лучами и тороидальными резонаторами диаметр области взаимодействия (и диаметр катода) не превышает $\sim \lambda/2$, что лимитирует число лучей. В приборах с кольцевыми резонаторами число лучей ограничено допустимыми размерами катода и сгущением спектра собственных колебаний резонаторов. В обоих случаях увеличение токов лучей также лимитировано из-за плотного расположения парциальных катодов и ограничения плотности токоотбора требованиями по долговечности. Поэтому исследования новых способов повышения мощности клистронов являются актуальными.

2. Параметры проектируемого многолучевого клистрона с радиальным расположением электронных потоков

С целью повышения выходной мощности многолучевых клистронов (МЛК) предлагается использовать кольцевые резонаторы и набор лучей, сходящихся по радиусам в одной плоскости от парциальных катодов на периферии прибора к коллектору в центре (рисунок 1).

Входной и промежуточные резонаторы выполнены с индивидуальными каналами, а выходной – с общим каналом для всех лучей, поскольку сходящиеся лучи здесь сливаются. Электронные потоки эмитируются парциальными пушками,

распространяются в индивидуальных каналах, а их взаимодействие с полем осуществляется в общих зазорах резонаторов. Отработанные пучки после прохождения общего для всех выходного резонатора попадают в коллектор, где отклоняются и распределяются на большую площадь.

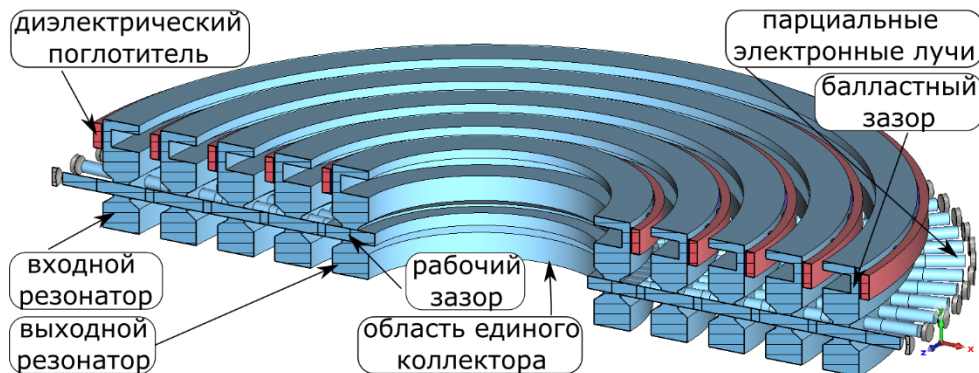


Рисунок 1. Модель вакуумной части анодного блока многолучевого клистрона с радиальным расположением электронных потоков. Красным цветом обозначен поглотитель.

Предложенная конструкция обладает преимуществами по сравнению с традиционными МЛК. Она позволяет уменьшить напряжение питания за счёт увеличения числа лучей и площади эмиттеров. Каждый луч невозмущен и прямолинеен вплоть до коллектора, что облегчает его транспортировку. Отработанный пучок отклоняется уже в коллекторе, где его возмущение не критично. Парциальные лучи имеют небольшой первеанс, что позволяет достичь высокого КПД. Появляется возможность использования большого числа лучей для достижения высокой мощности при небольших размерах парциальных катодов. Плотность токоотбора может быть понижена, что увеличивает срок службы. Большая проводимость потока в выходном резонаторе может обеспечить широкую полосу.

Предложенный подход проанализирован на примере пятирезонаторного клистрона с 72 лучами, ускоряющим напряжением 58 кВ, парциальным микропервеансом $0.8 \text{ мкА/В}^{1.5}$ с целью обеспечить выходную мощность 25-30 МВт. Зазоры резонаторов подобраны в соответствии с углом пролета $\beta_e d = 90^\circ$, где $\beta_e = 2\pi/L_e$ – постоянная распространения электронного потока, $L_e = v_e/f_0$ – электронная длина волны, v_e – скорость электронного потока. Диаметр канала ограничен соотношением $\gamma a \leq 1$ [2] и составляет 7 мм при параметре $\gamma a = 0.4$, где γ – поперечная постоянная распространения электронного потока. Характеристическое сопротивление выходного резонатора 5 Ом. Диаметр эмиттера 10 мм, плотность токоотбора – 14 А/см^2 .

Основные параметры исследуемого многолучевого клистрона с радиальным расположением электронных потоков представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры исследуемого многолучевого клистрона

Частота, ГГц	Выходная мощность, МВт	Число лучей	Напряжение, кВ	Ток на луч, А	Усиление, дБ	КПД, %
2.856	26.5	72	58	11.2	50	57

3. Проектирование кольцевых резонаторов клистрона

Анодный блок состоит из пяти сверхразмерных кольцевых резонаторов, работающих на моде H_{002} . Расчёт собственных типов колебаний резонатора демонстрирует густой спектр (рисунок 2 а), который не получается разредить с помощью изменения геометрии или путём внесения в резонансную полость

настроечных элементов. Предлагается новая методика селекции мод сверхразмерного резонатора основанная на том, что для аксиально-симметричного типа колебаний азимутальные компоненты токов отсутствуют. Поэтому в резонаторе можно разместить диэлектрический поглотитель, закрытый экраном с щелями связи, параллельными радиальным плоскостям резонатора. Это позволяет значительно понизить собственные добротности всех азимутально-несимметричных видов, не влияя на добротность рабочей, аксиально-симметричного типа. Наиболее эффективно разместить щели связи с поглотителем в области максимальных азимутальных токов нерабочих мод. Для этой цели в конструкцию резонатора введен дополнительный, балластный зазор и в качестве рабочей моды выбрана мода H_{002} . В области балластного зазора, где находится максимум азимутальных токов, размещен диэлектрический поглотитель с параметрами $\epsilon=28$, $\text{tg}\delta=0.5$ (рисунок 3). При работе на моде H_{001} поглотитель пришлось бы располагать в области рабочего зазора, а значит увеличивать площадь зазора и понижать характеристическое сопротивление резонатора.

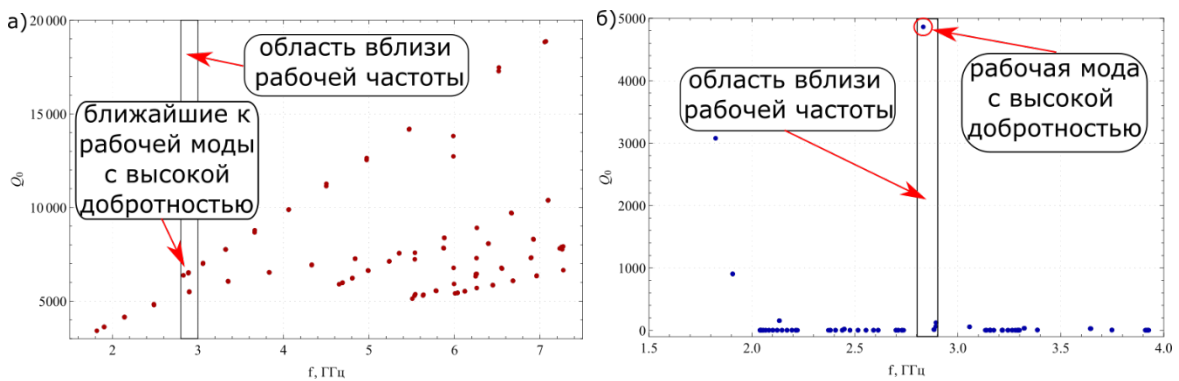


Рисунок 2. Зависимость добротности от частоты первых 100 собственных колебаний кольцевого резонатора при отсутствии поглотителя (а) и с поглотителем (б).

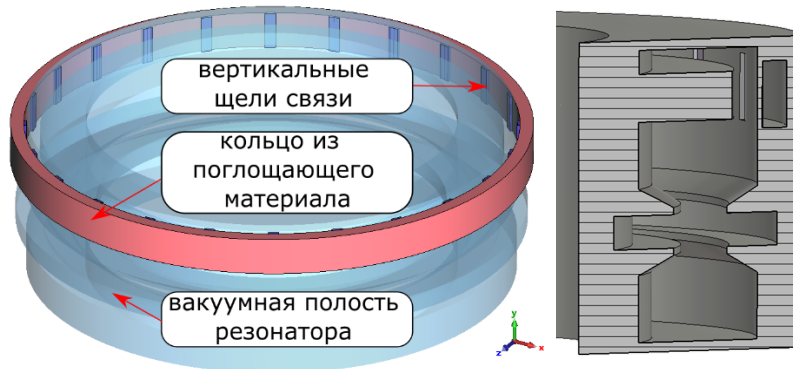


Рисунок 3. Кольцо из поглощающего материала вместе с вертикальными щелями связи для подавления собственной добротности паразитных типов колебаний.

Аксиально-симметричная нерабочая мода H_{001} рассмотренным методом селекции не подавляется, но ее частота ~ 1.8 ГГц находится далеко от рабочей полосы, поэтому она не влияет на работу клистрона. Для сверхмощного клистрона нагруженная добротность рабочей моды выходного резонатора обычно оказывается низкой ($Q_{\text{load}} \sim 25$) и может быть близка к добротностям нерабочих мод. Однако, поскольку во всех резонаторах группирователя модуляция электронного потока происходит в аксиально-симметричных полях, то конвекционный ток пучка в выходном зазоре будет аксиально-симметричным и наиболее эффективно будет взаимодействовать только с рабочей аксиально-симметричной модой. Таким образом, в выходном резонаторе происходит дополнительная селекция мод благодаря различиям в азимутальном

индексе тока пучка и нерабочих мод резонатора. Кроме того, рабочие моды во всех резонаторах имеют весьма близкие частоты, в то время как паразитные моды для резонаторов разного диаметра имеют разные частоты, что будет дополнительно подавлять их влияние на АЧХ клистрона.

4. Расчёт пространства взаимодействия

Расчёт пространства взаимодействия электронного потока с полями резонаторной системы проводился в одномерном однолучевом приближении (пучки считались идентичными). Заполнение канала пучком принято равным 60%. В результате оптимизации получены выходные характеристики на центральной частоте, а также рассчитаны распределение фазовых траекторий электронов вдоль пространства взаимодействия клистрона, получено распределение амплитуды первой гармоники тока (рисунок 4).

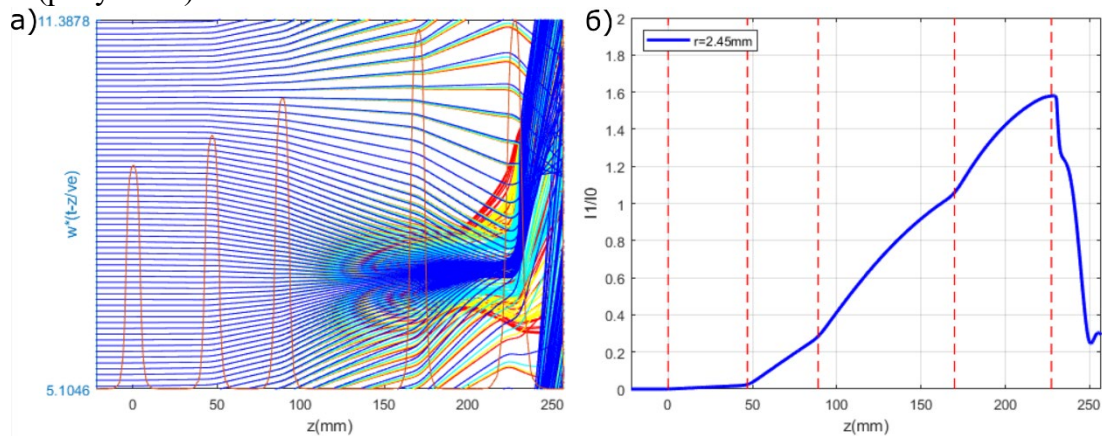


Рисунок 4. Распределение фазовых траекторий электронов вдоль пространства взаимодействия клистрона (а). Распределение амплитуды первой гармоники тока (б).

Гармоника тока достигает величины 1.6, что позволяет обеспечить в МЛК S-диапазона СВЧ мощность не менее 26 МВт. При этом КПД составляет 57%, а коэффициент усиления 50 дБ при ускоряющем напряжении 58 кВ и токе пучка 11.2 А.

5. Заключение

В работе предложена и исследована конструкция кольцевых резонаторов клистрона, работающих на типе колебания H_{002} , с рабочим и дополнительным балластным зазорами. Изучены их электродинамические характеристики, а также критерии их эффективного взаимодействия с электронными пучками. Рассмотрена методика селекции мод в сверхразмерных кольцевых резонаторах.

В результате проведённых теоретических расчётов и трёхмерного моделирования электромагнитных полей резонаторов установлено, что предложенная методика селекции мод позволяет обеспечить одномодовое взаимодействие в сверхразмерном кольцевом резонаторе. Большая площадь эмиссии, развитая в азимутальном направлении, позволяет использовать большое число парциальных пучков с низким первеансом – в рассмотренном примере задействовано 72 луча с первеансом 0.8 мкА/В^{1.5} – общий первеанс достигает 57.6 мкА/В^{1.5}. Поэтому можно ожидать высоких значений выходной мощности и КПД.

Стоит отметить, что имеется возможность дальнейшего улучшения группирователя с помощью различных методов повышения эффективности электронно-волнового взаимодействия, например БАК-метода группировки [3].

Список литературы

1. Борисов Л.М., Гельвич Э.А., Жарый Е.В., Закурдаев А.Д. и др. Мощные многолучевые электровакуумные усилители СВЧ // Эл. Техника, сер. СВЧ-техника, 1993, N3, с. 12-20.
2. Хайков А. З. Клистронные усилители. М., “Связь”, 1974. 392 с. с ил.
3. I.A.Guzilov. L and S-band high-efficiency multi beam klystron development. ВАС – method of increasing efficiency. CLIC workshop, Geneva, CERN, 3-7 February, 2014.