

О полосе частот выходной системы многолучевого клистрона

А.В. Галдецкий

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: Рассмотрена возможность расширения полосы частот выходного резонатора многолучевого клистрона путем значительного понижения нагруженной добротности, что сопровождается понижением электронного КПД и мощности. Технический КПД прибора может быть увеличен путем использования рекуперации, а падение мощности – за счет увеличения числа стволы лампы. Предложены изменения конструкции магнитной системы для реализации режима рекуперации.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, рекуперация, коллектор, добротность, резонатор

1. Введение

Клистрон остается одним из наиболее используемых в радиолокации СВЧ приборов, Увеличение рабочей полосы частот, мощности, КПД клистрона является весьма востребованной задачей. Эти параметры зависят как от построения клистрона в целом, так и от конструкции выходного резонатора и его фильтровой системы.

Узкая полоса частот является главным недостатком фазированных решеток на основе вакуумных приборов перед твердотельными радарными.

Полоса частот группирователя не имеет принципиальных ограничений и может быть расширена ценой увеличения числа резонаторов (удлинения лампы) и, возможно, уменьшения усиления.

Полоса частот выходного резонатора в основном определяется его нагруженной добротностью

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{k}{Q_n} = k \rho I_0 \frac{U_0}{U_1} \frac{M^2}{U_0} \frac{I_1}{I_0}$$

где Δf – ширина полосы; f_0 – центральная частота полосы усиления; $k = 1.5-2$ – коэффициент, учитывающий влияние пассивных резонаторов, Q_n , ρ – нагруженная добротность и волновое (характеристическое) сопротивление резонатора, $M \approx 0.9$ – коэффициент взаимодействия электронного потока с СВЧ электрическим полем в зазорах выходного резонатора; I_1 , U_1 – вч ток пучка и вч напряжение в выходном зазоре. При хорошем группирователе $I_1 \approx (1.1-1.4) \cdot I_0$, где I_0 – ток пучка клистрона.

Если предполагается работа в режиме большого КПД (<30-50%), то мы считаем, что $\frac{U_0}{U_1} \approx 1$ и тогда $\frac{\Delta f}{f_0} \approx \rho I_0$ – полоса ограничена величиной произведения

проводимости пучка на характеристический импеданс выходного резонатора. Разработчики борются за повышение обоих параметров и в основном уже исчерпали возможности их подъема. Например, увеличение характеристического сопротивления резонатора ρ в многозазорной конструкции приводит к следующим проблемам:

- сгущается спектр собственных колебаний, так что частоты паразитных мод попадают в рабочую полосу (широкую)
- электронная нагрузка некоторых мод оказывается отрицательной и возможно возникновение самовозбуждения (в т.ч. вне полосы)

2. Многолучевой коллектор с рекуперацией

Мы предлагаем отказаться от требования высокого электронного КПД и использовать перенагруженный выходной резонатор (фильтровую систему). Возникающее при этом падение электронного КПД можно компенсировать использованием рекуперации электронного потока [1], а уменьшение выходной мощности – увеличением тока прибора, например увеличением числа стволов (например с 3 до 9). При малом электронном КПД разброс по энергиям отработанных электронов невелик, что способствует эффективной рекуперации пучка. При сильной нагрузке выходного резонатора ($Q_n \sim 10$) снижаются требования к точности настройки выходного резонатора.

Рассмотрим эти меры подробнее.

После прохождения коллекторного полюса электронные пучки быстро расширяются. Это делает невозможным закрытие торца коллектора крышкой с индивидуальными отверстиями для каждого луча – на перемычки будет осаждаться значительная часть тока, что неизбежно приведет к перегреву.

Традиционное использование общего большого отверстия в коллекторе также непригодно. Из-за большого диаметра отверстия в коллекторе тормозящее поле проникает далеко вглубь коллектора и вытягивает значительный ток вторичных электронов, который перегревает коллекторный полюс, понижает КПД и может приводить к самовозбуждению. Для подавления обратного тока мы предлагаем использовать индивидуальные отверстия в коллекторе для каждого луча и выполнить коллекторный полюс разрезным (рисунок 1).

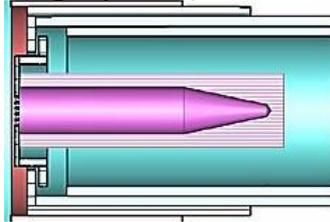


Рисунок 1. Конструкция экранов коллектора и разрезного коллекторного полюса

Центральная часть полюса с отверстиями является частью коллектора и находится под высоким потенциалом, а периферийная часть полюса заземлена. Магнитное сопротивление зазора между частями полюса сделано небольшим, чтобы не исказить магнитное поле в рабочем зазоре. Разрезной коллекторный полюс делает коллектор закрытым, позволяет полностью устранить электрическое поле из коллектора, что резко уменьшает ток возвратных электронов. При потенциале центральной части полюса равном потенциалу коллектора резко уменьшается нагрев полюса возвратными электронами, поскольку они не ускоряются полем рекуперации. Сравнение распределения электронных потоков в коллекторе традиционной конструкции и в коллекторе с разрезным полюсом показано на рисунке 2:

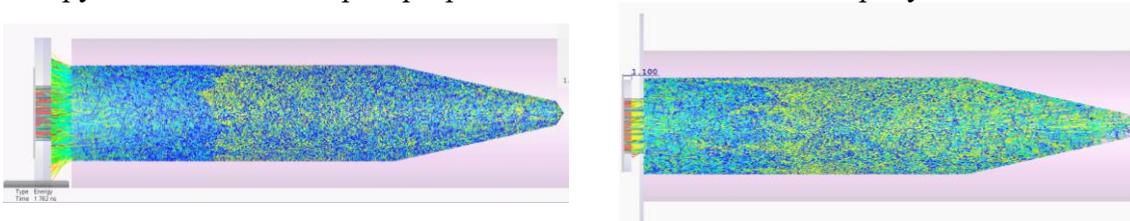


Рисунок 2. Конструкция экранов коллектора и разрезного коллекторного полюса

Как и в других системах с рекуперацией здесь можно использовать сильноточный низковольтный нестабилизированный источник и слаботочный высоковольтный

стабилизированный источник вместо традиционного сильноточного высоковольтного стабилизированного источника. Это позволит уменьшить массогабариты и облегчить защиту от пробоев.

3. Спектр собственных частот в резонаторах многоствольной конструкции

При увеличении числа стволів в лампе и переходе на высший тип колебаний с целью компенсации падения мощности спектр собственных частот сужается. Однако анализ показывает, что такое сгущение не является критическим (рисунок 3)

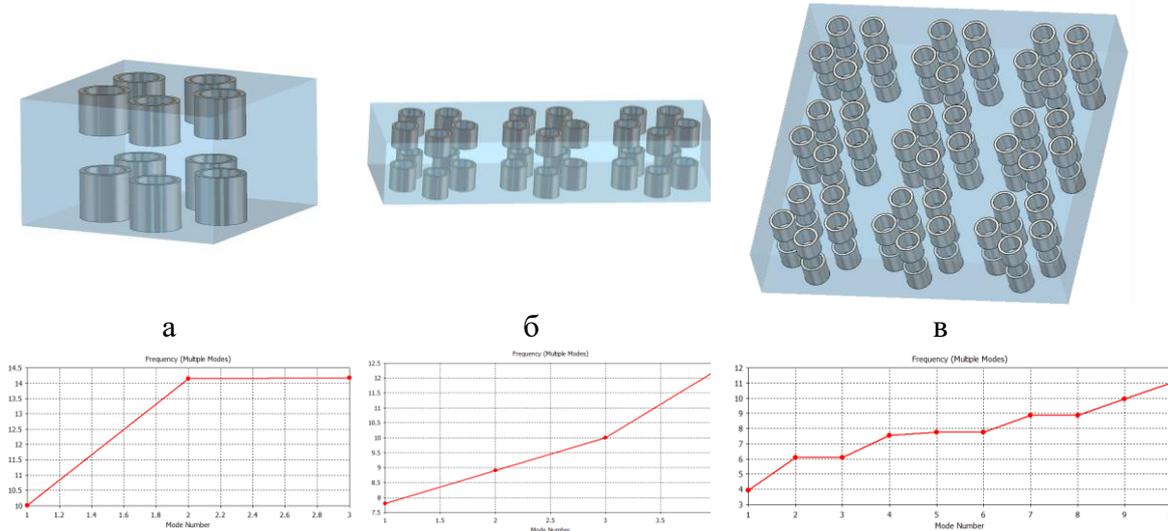


Рисунок 3. Конструкция резонаторов с одним (а), тремя (б) и девятью (в) стволами и спектры их собственных колебаний.

Расстояние по частоте между рабочим типом колебаний и ближайшим паразитным типом составляет 4.2 ГГц для одноствольного варианта и 1.1 ГГц для трех- и девятиствольного вариантов, что достаточно для работы даже широкополосного резонатора.

4. Заключение

Рассмотрена возможность расширения полосы частот выходной системы мощного многолучевого клистрона за счет увеличенной нагрузки выходного резонатора. Сопутствующее этому уменьшение электронного КПД можно компенсировать использованием рекуперации пучка в коллекторе. Понижение выходной мощности можно компенсировать увеличением числа стволів – до 9 (и более). Рекуперация позволит использовать слаботочный высоковольтный источник питания и сильноточный, но более низковольтный чем в системе без рекуперации, что уменьшит массогабариты источника питания.

Предложенная новая конструкция коллектора с разрезным коллекторным полюсом позволяет существенно снизить обратный ток из коллектора и дает возможность увеличивать степень рекуперации лампы и получать высокий КПД.

Список литературы

1. Shi Z., Gamzina D., Barnett L.R. и др. 3-D Simulations and Design of Multistage Depressed Collectors for Sheet Beam Millimeter Wave Vacuum Electron Devices // IEEE Transactions on Electron Devices. 2013. Т. 60. № 9. — с. 2912-2917.