

Физические причины ограничения долговечности многолучевых клистронов и возможности ее увеличения

А.В. Галдецкий, С.П. Морев

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Аннотация: Рассмотрена связь конструктивных параметров многолучевого клистронов с его сроком службы. Обсуждаются возможности увеличения площади эмиссии катода за счет совершенствования электронно-оптической и резонаторной систем.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, катод, управляющий электрод, плотность токоотбора, метаматериал, электронный пучок.

1. Введение

Вакуумные СВЧ приборы играют ключевую роль в обеспечении работы РЛС, многих систем связи и РПД. При относительно невысоком напряжении питания они позволяют обеспечить большую мощность, высокий КПД, компактные размеры мощного локатора. Однако серьезным недостатком многолучевых вакуумных приборов, в частности клистронов, является небольшой срок службы. В тороидальных резонаторах традиционных многолучевых клистронов диаметр области взаимодействия (рабочего зазора) не превышает $\lambda/2$. В конструкции с параллельными лучами, учитывая небольшую компрессию пучков в пушке, это приводит к ограничению общего диаметра ($\sim \lambda/2$) и эмиссионной площади катода. В свою очередь, это диктует необходимость увеличения плотности токоотбора, температуры катода и скорости испарения активного вещества, следовательно – к ограничению срока службы. Таким образом традиционная геометрия резонаторной и электронно-оптической систем накладывает принципиальные ограничения на срок службы прибора.

Кром того, на срок службы клистронов оказывают влияние как производственно-технологические факторы (качество вакуума, качество материалов и технологии), так и совершенствование катодов и физики их работы (состав, нанопорошки, покрытия, объем резервуара), что активно исследовалось ранее. Однако, далеко не исследованы физико-технические факторы, связанные с совершенствованием конструкции клистронов (направленным в основном на увеличение площади эмиссии), в частности:

- Оптимизация общего дизайна клистронов (число стволы и лучей, питающие напряжения, способы модуляции);
- Использование «толстого» положительного управляющего электрода (УЭ);
- Использование второго анода и подстраиваемой вольтодобавки;
- Криволинейная ЭОС в пушке;
- Использование резонаторов с метаматериалом;
- ЭОС с радиальным расположением лучей;
- ЭОС с планарным расположением лучей.

Указанные возможности можно использовать как по отдельности, так и совместно. Отметим, что увеличение площади эмиссии (и плотности токоотбора), позволяет понизить температуру катода и подогревателя, что повышает надежность работы катода.

2. Оптимальное число лучей

Выбор числа лучей существенно влияет на площадь эмиссии и, следовательно, на срок службы прибора. Если рассмотреть прибор с N лучами, расположенными на окружности радиуса R (определяемого конструкцией электродинамической системы), то нетрудно показать, что максимально возможная общая площадь эмиссии S_{em}

зависит от N как $\frac{S_{em}}{\pi R^2} = N \left(\sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \right)^2$ (Рисунок 1):

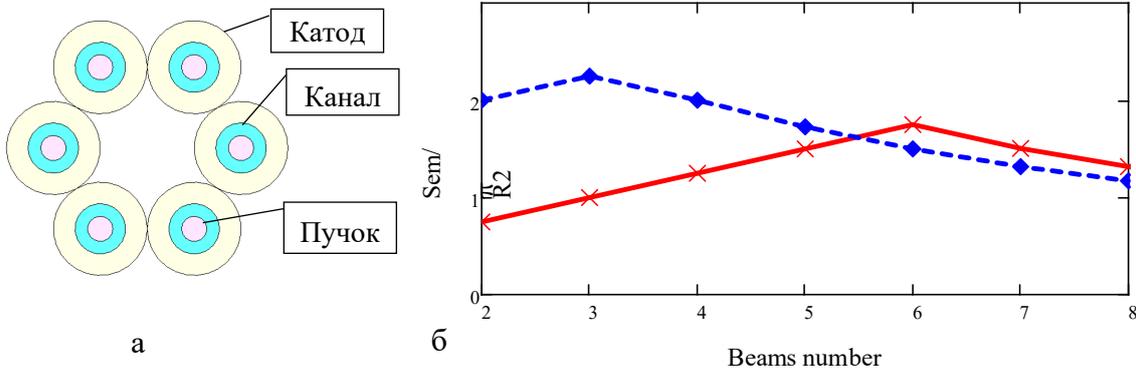


Рисунок 1. Расположение каналов и катодов (а) и зависимость максимальной площади эмиссии от числа лучей на окружности N : без центрального луча (пунктир), с центральным лучом (сплошная линия).

Очевидно, что оптимальное с точки зрения площади эмиссии (долговечности) число лучей на ствол N равно 3 (без центрального луча), а с центральным лучом - 7. Аналогичные расчеты можно выполнить и для геометрий с лучами на нескольких окружностях. Эти данные необходимо учитывать при выборе числа лучей, компромиссного с точки зрения срока службы, КПД, полосы частот клистрона.

Увеличение числа стволков позволяет увеличить мощность прибора, и при одновременном уменьшении тока на луч – срок службы, однако ценой возможного сужения рабочей полосы частот, для компенсации которого потребуется совершенствование резонаторов (многозаярная конструкция).

3. Триодная пушка с положительным УЭ

Как правило в мощных импульсных приборах используются триодные пушки с нулевым потенциалом на УЭ в рабочем режиме и отрицательным – между импульсами тока. При этом приходится выбирать геометрию электродов так, чтобы обеспечить требуемый первеанс пучка, что влечет за собой значительное повышение запирающего напряжения при росте первеанса. В работе рассмотрена конструкция триодной электронной пушки (Рисунок 2) с числом лучей, пониженным до четырех и «толстым» УЭ, расположенным над катодом (в отличие от прототипа, где УЭ охватывал парциальный катод). Это позволило увеличить площадь эмиссии в 2.6 раза по сравнению с прототипом и понизить плотность токоотбора до ~ 10 А/см², что способно увеличить срок службы до 5-10 тыс. часов.

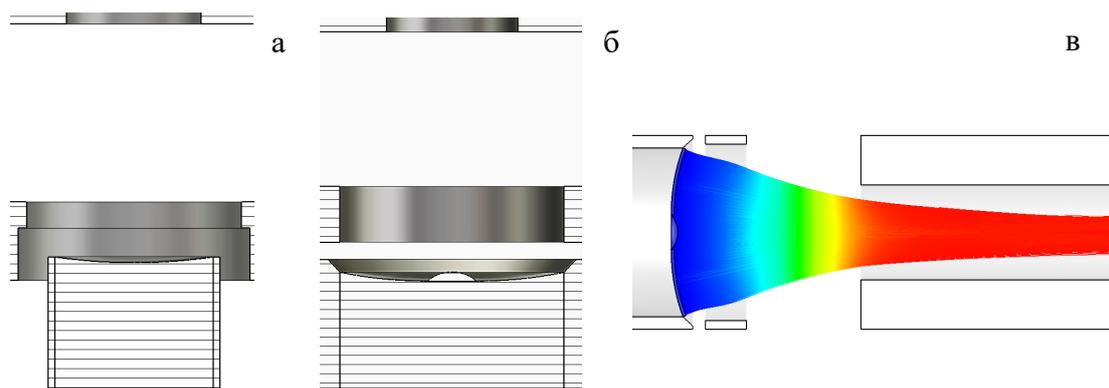


Рисунок 2. Геометрия пушки прототипа (а), рассмотренная в работе конструкция пушки (б) и траектории частиц в ней (в).

Дополнительно, при этом снижается напряжение модуляции и достигается значительное понижение напряженности поля в пушке, что увеличивает надежность работы прибора.

4. Увеличение срока службы при использовании второго анода

При исчерпании срока службы, как правило, у катода возрастает контрастность пятнистости, и в результате падает площадь эмиссии и ток пучков. Увеличение анодного напряжения при использовании второго анода позволяет компенсировать падение тока, что успешно продемонстрировано в космических ЛБВ. В работе рассмотрена возможность использования второго анода в многолучевых клистронах для увеличения срока службы (Рисунок 3). Насколько нам известно, этот подход в многолучевых клистронах ранее не применялся.

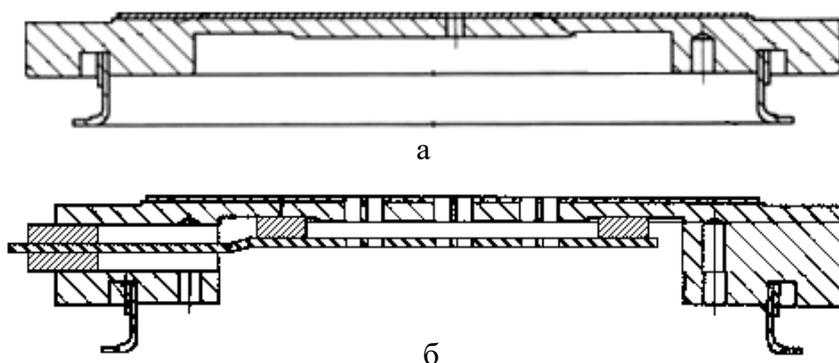


Рисунок 3. Геометрия катодного полюса магнитной системы прототипа (а) и предлагаемый катодный полюс вместе с вторым анодом (б).

Отметим, что использование второго анода не только позволит увеличить срок службы, но и устанавливать рабочий ток, а также контролировать токооседание в пушке, при настройке прибора.

5. Криволинейная электронно-оптическая система в пушке

Значительный резерв в обеспечении увеличенной площади эмиссии содержится в использовании криволинейной оптики в пушке, что активно исследуется во всем мире [1-3].

В работе предложена конструкция 6-лучевой диодной электронной пушки с криволинейной оптикой, позволяющая увеличить площадь эмиссии в 2 раза по

сравнению с прототипом (Рисунок 4).

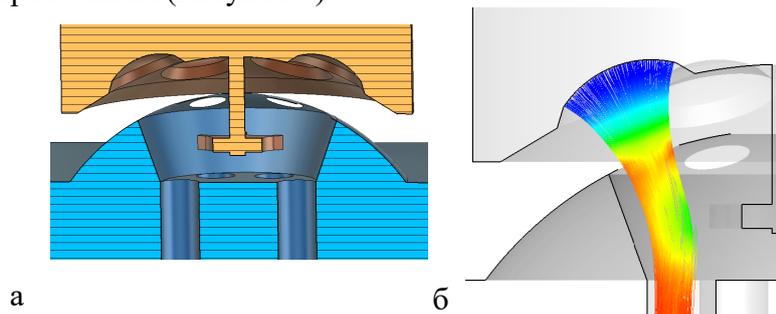


Рисунок 4. Геометрия 6-лучевой диодной пушки с криволинейной оптикой (а) и траектории электронов частичного пучка (б).

6. Резонаторы с метаматериалом

Совершенствование электродинамической системы может привести к уменьшению требований по плотности токоотбора и повышению срока службы. Например, использование резонаторов с метаматериалом (Рисунок 5) позволяет расширить область однородного СВЧ электрического поля в резонаторе до величины λ и более, увеличить число лучей в ней и выходную мощность прибора [4-6]. При этом величина характеристического импеданса резонаторов, отнесенного к одному лучу, оказывается заметно выше, чем в традиционных многолучевых клистронах. Это позволяет понизить плотность токоотбора и, тем самым, увеличить срок службы.

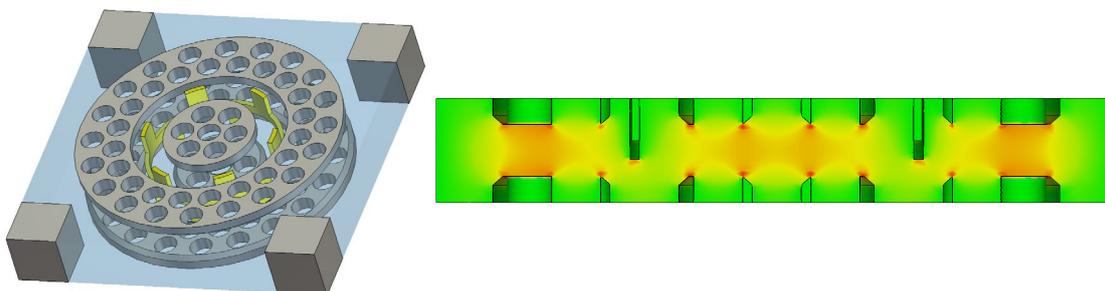


Рисунок 5. Геометрия 47-лучевого резонатора X-диапазона с метаматериалом (а) и структура поля рабочей моды в разрезе (б) [4].

7. Клистрон с радиальным расположением лучей

Клистрон с радиальным расположением лучей [7-10] позволяет существенно увеличить площадь эмиссии, даже при плотном расположении лучей в области выходного резонатора. Это дает возможность понизить плотность токоотбора и, тем самым, увеличить срок службы.

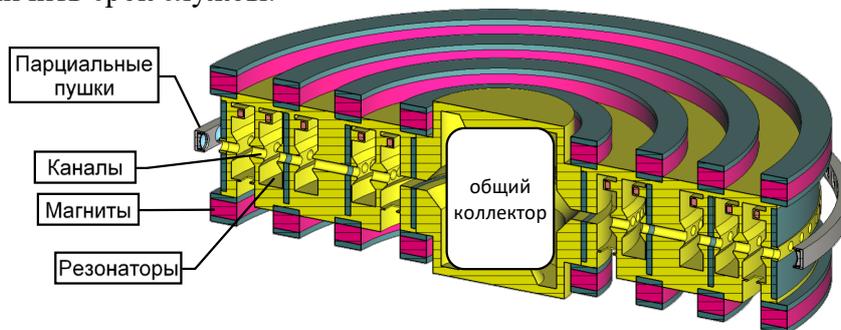


Рисунок 6. Модель вакуумной части анодного блока многолучевого клистрона с радиальным расположением электронных потоков [8].

8. Пушка с планарным расположением лучей и неизотропной компрессией пучков

Плотная упаковка каналов в области взаимодействия традиционных клистронов не позволяет реализовать значительную компрессию пучков в пушке. Однако, при использовании расположения каналов, плотного только в одном направлении, можно осуществить значительную компрессию пучков в ортогональном направлении [11-14] (Рисунок 7) и, таким образом, увеличить площадь эмиссии и срок службы клистрона.

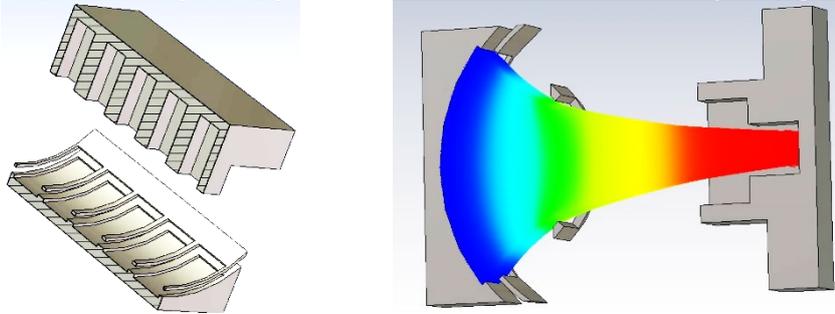


Рисунок 7. Геометрия 5-лучевой пушки с планарным расположением лучей в разрезе и траектории частиц луча при анизотропной компрессии [14].

9. Заключение

1. Традиционная геометрия резонаторной и электронно-оптической систем многолучевых клистронов накладывает принципиальные ограничения на срок службы клистрона, зависящие от параметров конкретного прибора.
2. Выходом из ситуации может быть, наряду с совершенствованием катодов, изменение конструкции клистрона, направленное на максимальное увеличение площади эмиссии за счет:
 - Оптимизации геометрии и конструкции пушки («толстый» положительный УЭ, оптимальное число лучей);
 - Использования второго анода с дополнительной вольтодобавкой;
 - Использования пушки с криволинейной оптикой;
 - Применения резонаторов с метаматериалом;
 - Конструкции прибора с радиальным или планарным расположением лучей, развитой эмиссионной поверхностью и дополнительной компрессией пучков в пушке.

Список литературы

1. Ives L., Bui T., Read M. et al. Design of a doubly convergent multiple beam gun // Proc. 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). - 2010. - p. 281-282.
2. Ives R.L., Attarian A., Tallis W. et al. Design of Doubly Convergent Multiple-Beam Electron Guns // IEEE Transactions on Plasma Science. - 2010. - v. 38. - № 6. - p. 1337-1344.
3. Ives L., Bui T., Read M. и др. Design of asymmetrical electron beam devices using computer optimization // Proc. 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC '09. - 2009. - p. 119-120.
4. Галдецкий А.В. Резонатор мощного многолучевого широкополосного клистрона X-диапазона с метаматериалом // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. - 2023. - Т. 5. - с. 9-10.
5. Галдецкий А.В. О возможности использования метаматериала для повышения мощности многолучевых клистронов // Радиотехника и электроника. - 2022. - Т. 67. - № 10. - с. 973-980.
6. Галдецкий А.В. Многолучевой клистрон. Патент RU 2799772 C1, Россия, 2022
7. Голованов Н.А., Галдецкий А.В. Моделирование и оптимизация сверхмощного многолучевого клистрона S-диапазона с радиальным расположением лучей // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. - 2023. - Т. 5. - с. 1-2.

8. Галдецкий А.В., Голованов Н.А. Многолучевые клистроны с радиальным расположением лучей // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». С-Петербург, Россия. - 2023. – с. 4-9.
9. Галдецкий А.В. Радиальный клистрон - перспективный СВЧ усилитель // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) материалы конференции в 13 томах. Севастополь. - 2016. – с. 32-35.
10. Галдецкий А.В., Голованов Н.А. Многолучевой клистрон. Патент RU 2804521 С1, Россия 2023.
11. Boyd M.R., Dehn R.A., Hickey J.S. et al. The multiple-beam klystron // IRE Transactions on Electron Devices. - 1962. - v. 9. - № 3. - p. 247-252.
12. Larionov A., Fukuda S. Design of the confined flow multiple beam guns with a compression for L and X-band powerful klystrons // in 2007 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC - 2007). - 2007. – p. 1-2.
13. Lu S., Zhang C., Wang S. et al. Stability Analysis of a Planar Multiple-Beam Circuit for W-Band High-Power Extended-Interaction Klystron // IEEE Transactions on Electron Devices. - 2015. - v. 62. - № 9. - p. 3042-3048.
14. Galdetskiy A.V. On the opportunity of bandwidth increasing in multibeam klystron with planar layout of the beams // Proc. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2011). - 2011. p. 317-318.