

# Исследование влияния ввода дополнительных стержней в многоззорном многоканальном клистронном резонаторе на его электродинамические характеристики

В.А. Соляник, А.Ю. Мирошниченко, Н.А. Акафьева

СГТУ им. Ю.А. Гагарина

**Аннотация:** в данной работе исследовался миниатюрный трехззорный резонатор пролетного клистрона с добавленными по периметру внутреннего объема металлическими стержнями. Рассчитывались электродинамические параметры резонатора: резонансные частоты, добротность, характеристическое сопротивление, эквивалентное сопротивление. Проведено сравнение измеренных величин для резонатора без металлических стержней с моделью со стержнями, расположенными по внутреннему периметру. В результате расчетов установлено, что предложенный способ обеспечивает снижение собственной добротности, а также резонансного сопротивления, смещение определенных резонансных частот и может рассматриваться как альтернативный метод использования пассивных потерь.

**Ключевые слова:** пролетный клистрон, многоззорный резонатор, диэлектрическая подложка, полосковая линия, добротность, эквивалентное сопротивление, резонансная частота, пассивные потери.

## 1. Введение

Многочувствительные клистроны – одни из распространенных микроволновых приборов [1], которые обладают рядом преимуществ перед их однолучевыми аналогами, такими как расширенная полоса частот, сниженное ускоряющее напряжение, уменьшенные габариты и масса. Наряду с клистроном большой мощности ведутся разработки миниатюрных приборов для средств телекоммуникации и связи [2] с мощностью до 1 кВт. При разработке клистронов резонансным системам уделяется повышенное внимание, так как от их характеристик зависят выходные параметры прибора. Известно, что для получения высокого КПД клистрона необходимо переходить к многоззорным резонаторам [3].

Переход к многоззорным резонаторам расширяет полосу частот резонансной системы, также для этих целей размещают в объеме резонатора в поперечном сечении металлические ребра [4], которые снижают собственную добротность резонатора. Известны конструкции резонаторов клистронов, в объеме которых расположены стержни [5], проходящие от одной из боковых стенок резонатора к противоположной боковой стенке, таким образом, чтобы они были ориентированы перпендикулярно электрическому полю. Эти методы используются по отдельности или в комбинации для расширения полосы пропускания резонатора.

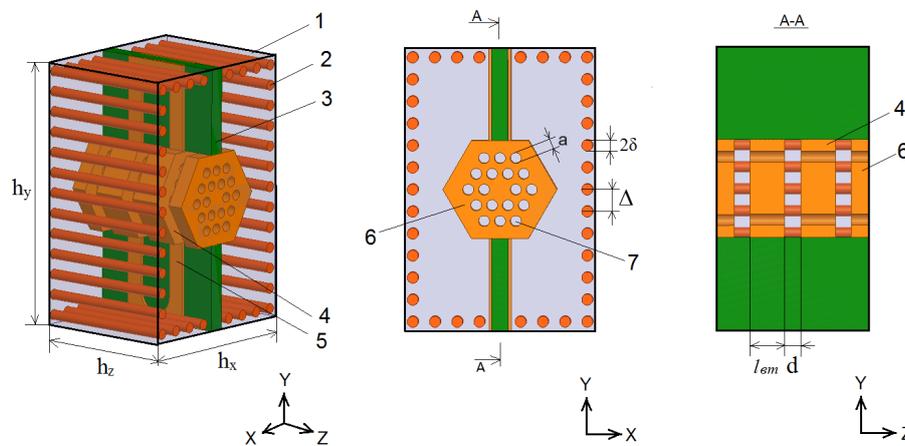
Наряду с классическими резонансными системами известны Photonic Band Gap (PBG) структуры [6], которые применяются в основном в мощных клистромах и ускорителях. Они представляют собой решетку металлических стержней с одним или несколькими дефектами решетки, в которых стержни отсутствуют. При этом такая структура может обладать свойством селекции мод, при котором определенные частоты поглощаются в решетке металлических стержней. На этом принципе было

предложено исследовать влияние одного слоя металлических стержней, расположенных в резонаторе по внутреннему периметру, подобно как это реализовано в интегрированных в подложку волноводах (ИПВ) или SIW- волноводах [7], причем стержни ориентированы вдоль силовых линий электрического поля основных мод.

Целью исследований, представленных в настоящей статье, было трехмерное электродинамическое моделирование миниатюрного трехзачорного резонатора пролетного клистрона с диэлектрической подложкой и полосковыми линиями, по внутреннему периметру которого расположены дополнительные металлические стержни для изучения их влияния на электродинамические характеристики.

## 2. Конструкция резонатора

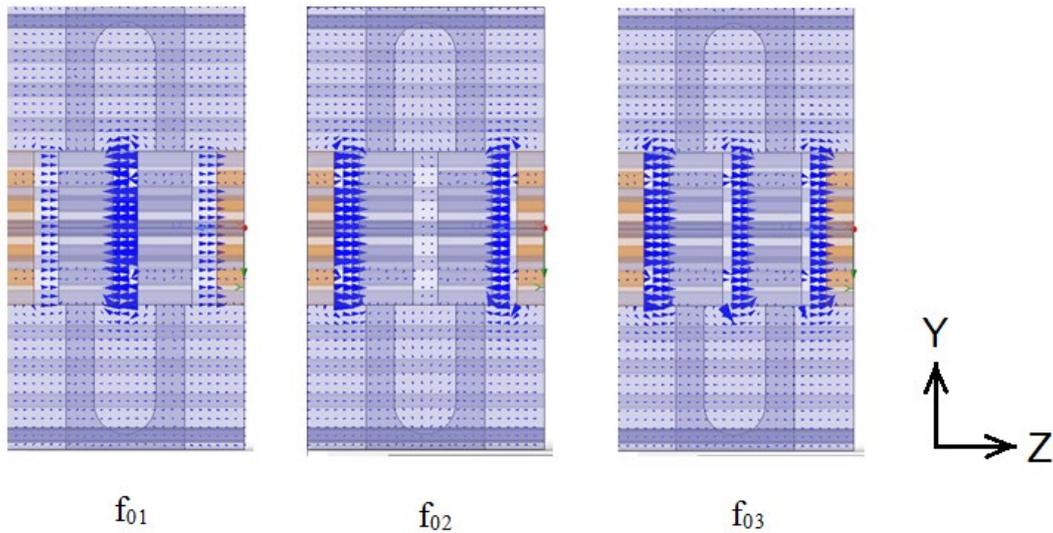
Базовая конструкция резонатора с полосковыми линиями на диэлектрической подложке была изучена ранее [8]. Конструктивно исследуемый резонатор представлен на рисунке 1. Прямоугольный объемный резонатор (1), имеющий по внутреннему периметру один слой металлических стержней (2) из меди, внутри которого расположена подвешенная диэлектрическая подложка (3) из алмаза, разделенная на две части. На подвешенной диэлектрической подложке размещены симметричные полосковые линии (5), которые электрически соединены с двумя центральными электродами (4) и корпусом объемного резонатора (1). Кроме того, имеются два боковых электрода (6), которые вместе с центральными электродами образуют три симметричных высокочастотных зазора резонатора. В центральных и боковых электродах имеются 17 пролетных каналов (7) для прохождения электронного потока.



**Рисунок 1.** Конструкция резонатора. Резонатор имеет следующие геометрические размеры в мм:  $h_z=9,6$ ;  $h_y=12$ ;  $h_x=18$ ;  $a=0,35$ ;  $d=1$ ;  $l_{\sigma m}=2,2$ .

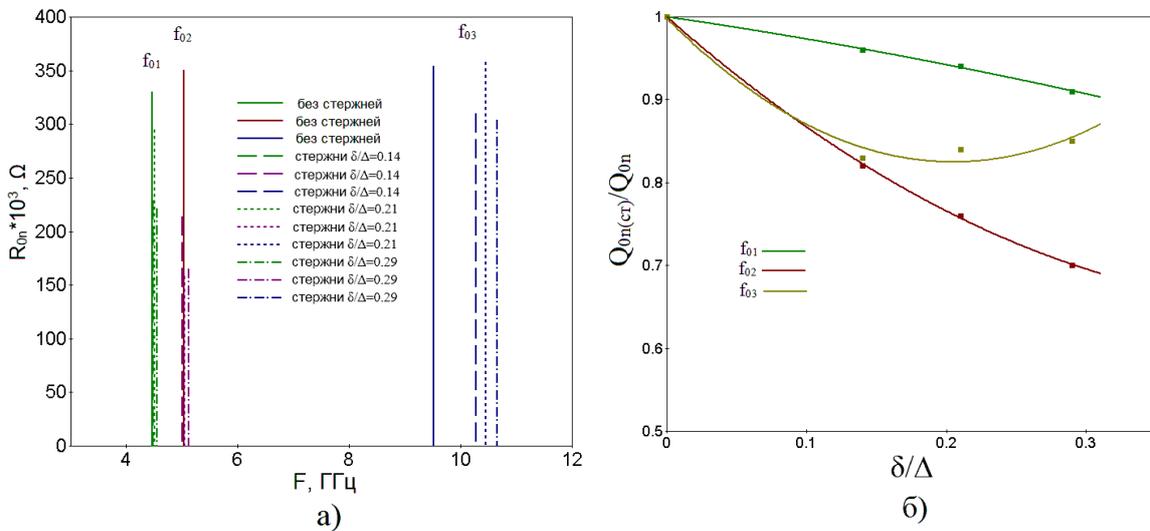
## 3. Результаты моделирования

Расчет резонатора проводился методом конечных элементов в диапазоне от 4 до 12 ГГц. На рисунке 2 представлены картины высокочастотных полей резонатора для трех частот, возбуждаемых в резонаторе:  $f_{01} - \pi$  мода;  $f_{02} - 3\pi/2$  мода;  $f_{03} - 2\pi$  мода. Просчитаны варианты резонатора без заполнения объема металлическими стержнями и с заполнением объема стержнями, причем частоты в этих двух случаях не поддерживались постоянными за счет изменения объема резонатора, как описано в [5].



**Рисунок 2.** Распределение высокочастотного электрического поля в зазорах резонатора для трех мод:  $f_{01}$  –  $\pi$  мода;  $f_{02}$  –  $3\pi/2$  мода;  $f_{03}$  –  $2\pi$  мода.

Исследовалось влияние введения стержней на электродинамические характеристики и спектр колебаний. Рисунок 3 иллюстрирует распределение спектра частот резонатора в диапазоне до 12 ГГц. Оценка амплитуды ведется по эквивалентному сопротивлению для каждой моды  $R_0 = \rho Q_0$ , где  $\rho$  – характеристическое сопротивление резонатора,  $Q_0$  – собственная добротность.



**Рисунок 3.** Спектр колебаний резонатора с учетом изменения толщины металлических стержней (а); нормированная добротность резонатора в зависимости от изменения толщины металлических стержней (б).

При оценке спектра колебаний выявлено следующее. Наличие стержней слабо влияет на резонансные частоты  $\pi$  и  $3\pi/2$  мод: для  $\pi$  моды уход частоты 1,9% при  $\delta/\Delta=0,29$  относительно невозмущенного случая, а для  $3\pi/2$  моды 1,7%. Для  $2\pi$  моды смещение частоты при  $\delta/\Delta=0,29$  относительно невозмущенной существенно больше (12%). Резонансное сопротивление  $R_0$  при вводе в резонатор металлических стержней уменьшается, но для разных мод это уменьшение различно. Наиболее сильно уменьшение параметра  $R_0$  проявляется на  $3\pi/2$  моде (до 53% относительно невозмущенного случая), на  $\pi$  моде уменьшение  $R_0$  до 33%. На  $2\pi$  моде влияние

стержней на резонансное сопротивление не так значительно, при  $\delta/\Delta=0,29$   $R_0$  уменьшается на 14% относительно невозмущенного случая.

На рисунке 3б приведены графики, иллюстрирующие зависимости добротности резонансных мод от нормированного радиуса вводимых стержней. Значения собственной добротности пронормированны к соответствующим  $Q_0$  у ненагруженного резонатора. Видно, что для  $\pi$  моды зависимость линейно снижается на 9%, для  $3\pi/2$  моды наблюдается практически линейное уменьшение около 15%, а вот для  $2\pi$  моды при вводе стержней с нормированным радиусом  $\delta/\Delta=0,14$  наблюдается уменьшение  $Q_0$ , далее при увеличении соотношения  $\delta/\Delta$  небольшой рост добротности в пределах 2%.

#### 4. Заключение

Исследован миниатюрный трехззорный резонатор пролетного клистрона с добавленными по периметру внутреннего объема металлическими стержнями. Установлено, что предложенный способ обеспечивает снижение собственной добротности, а также резонансного сопротивления, смещение определенных резонансных частот и может рассматриваться как альтернативный метод использования пассивных потерь.

Влияние дополнительной нагрузки в виде стержней на резонансное сопротивление разных мод не одинаково, в наибольшей степени это проявляется на  $\pi$  и  $3\pi/2$  модах, в наименьшей на  $2\pi$  моде. Метод также может быть полезен также при отстройке от нежелательных мод в резонансных системах подобного типа. Данное решение может быть полезно при конструировании многоканальных резонаторов пролетных клистронов.

#### Список литературы

1. Фрейдович И. А. и др. Перспективы развития многолучевых клистронов // Электроника и микроэлектроника СВЧ, Всероссийская конференция. – СПб: ЛЭТИ, 2014. – С. 2-5.
2. Анисимова Т. Ю. Миниатюрный усилительный клистрон Ku-диапазона длин волн. //Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – СПб: ЛЭТИ, 2014. – С. 402-406.
3. Григорьев А. Д. Многоззорные резонаторы для мощных усилительных клистронов миллиметрового диапазона длин волн //Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. –СПб: ЛЭТИ, 2014.- С. 131-135.
4. Bansiwala A. et al. A broadband rectangular reentrant cavity for multiple-beam klystron //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Vol. 66. – №. 7. – P. 3168-3170.
5. Bansiwala A. et al. A post-loaded rectangular reentrant cavity for broadband multiple-beam klystron //IEEE Electron Device Letters. – 2020. – Vol. 41. – №. 6. – P. 916-919.
6. Smirnov A., Newsham D., Yu D. PBG cavities for single-beam and multi-beam electron devices //Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. – IEEE, 2003. – Vol. 2. – P. 1153-1155.
7. Sirici S., Martínez J. D., Boria V. E. A novel magnetic coupling for miniaturized bandpass filters in embedded coaxial SIW //Applied sciences. – 2019. – Vol. 9. – №. 3. – P. 394.
8. Мирошниченко А. Ю. и др. Трехззорный резонатор для миниатюрного многолучевого клистрона // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. - 2021. - №8. - <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.7>.