

Пути повышения мощности низковольтных многолучевых клистронов

А.В. Галдецкий

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: Рассмотрены физические причины ограничения мощности низковольтных многолучевых клистронов. Показано, что использование в зазорах резонаторов метаматериала, состоящего из массива металлических индуктивных вставок, позволяет существенно повысить фазовую скорость электромагнитной волны в зазоре, что дает возможность увеличить однородность поля, действующего на пучки, площадь области взаимодействия, ток и мощность прибора без роста ускоряющего напряжения. Исследованы резонаторы для клистронов S, X и Ka диапазонов.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, метаматериал, фазовая скорость, кольцевой резонатор

1. Введение

Сверхмощные клистроны и клистроды (ЮТ) традиционно используются в качестве источников СВЧ мощности для ускорителей электронов [1; 2; 3]. Увеличение мощности таких приборов, как правило, сопровождается значительным ростом напряжения питания, которое достигает уровня нескольких сотен киловольт в однолучевых приборах. Для достижения высокого КПД клистроны необходимо понижать влияние пространственного заряда, что обеспечивается за счет ограничения первеанса электронного пучка на уровне $0.1-0.8 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ и влечет за собой необходимость повышения напряжения. Высокое напряжение питания влечет за собой необходимость усиления защиты от ионизирующего излучения, улучшения изоляции, борьбы с пробоями. Одной из возможностей понизить напряжение питания является использование многолучевой конструкции, которая позволяет при ограниченном первеансе парциального луча повысить общий ток прибора за счет увеличения числа лучей. Этот подход успешно реализован в ряде отечественных работ [4; 5], что позволило достичь уровня выходной мощности 7 МВт при напряжении питания ~60 кВ. В них использовались кольцевые резонаторы, работающие на основном, аксиальносимметричном виде колебаний E_{010} , что позволило обеспечить однородность вч поля по всем лучам и достаточно большое разнесение частот рабочего колебания и ближайшего паразитного. Дальнейшее увеличение мощности при увеличении радиуса кольцевого резонатора, который растет прямо пропорционально числу лучей, ограничивается возможностями изготовления катода и уменьшением частотного разделения рабочего и паразитного видов.

В тороидальном резонаторе традиционной конструкции число лучей пропорционально квадрату радиуса области взаимодействия, но радиус ограничен величиной $\sim 0.21 \lambda$ из-за роста неоднородности поля в рабочем зазоре [6].

Таким образом, традиционные конструкции резонаторов клистроны ограничивают дальнейшее увеличение числа лучей и мощности клистроны при фиксированном напряжении питания. Поиск возможностей дальнейшего роста мощности представляет большой научный и практический интерес.

2. Физические причины неоднородности поля в зазоре тороидального резонатора и влияние на них метаматериала

В аксиально-симметричном тороидальном резонаторе при величине зазора взаимодействия $d \ll \lambda$ (и пренебрегая влиянием каналов) зависимость компоненты поля E_z в зазоре от поперечных координат в цилиндрической системе описывается выражением $E_z(r, \varphi) = E_{0z} J_m(kr) \exp(jm\varphi)$, где J_m функция Бесселя, $k = \frac{\omega}{v}$ - волновое число, m - азимутальное число колебания (обычно $m = 0$). Это картина радиальной стоячей волны, существующей между двумя проводящими плоскостями зазора взаимодействия. Волновое число k и резонансная частота ω определяются фазовой скоростью волны $v = c$ и величиной импеданса, создаваемого внешней, «индуктивной» частью резонатора на краю области взаимодействия. Таким образом, структура поля аксиально-симметричного рабочего колебания в зазоре определяется функцией Бесселя $J_0(kr)$, которая слабо меняется при $kr \leq 1$, что принципиально ограничивает радиус области взаимодействия R_i

$$kR_i \leq 0.7 \quad (1)$$

Если обеспечить уменьшение волнового числа k за счет роста фазовой скорости v волны в материале, заполняющем зазор, то в соответствии с (1) можно значительно увеличить радиус области взаимодействия R_i без потери однородности поля. В качестве такого искусственного метаматериала можно использовать периодический или аperiodический набор индуктивных элементов (в простейшем случае – прямолинейных проводников), соединяющих противоположные стороны зазора взаимодействия. Свойства такого рода метаматериалов активно изучались многими авторами [7; 8; 9], в том числе в применении к резонаторам клистронов [10; 11; 12]. Однако в последнем случае метаматериал использовался в основном для локализации поля в области луча, а не для увеличения области однородного поля.

Рассмотрим возможность увеличения однородности поля на примере анализа одномерной однородной передающей линии с распределенными параметрами, что позволит понять качественные особенности поведения волны и в трехмерном случае. На основе эквивалентной схемы участка такой линии длиной dx (Рис. 1а) можно получить дисперсионную зависимость

$$k(\omega) = \sqrt{\frac{L}{L_1} \left(\frac{\omega^2}{\omega_{cut}^2} - 1 \right)} \quad \omega_{cut} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}} \quad (2)$$

где L [Гн/м], L_1 [Гн·м], C [пФ/м] – погонные значения реактивностей линии (Рис. 1а).

Очевидно, что у линии с метаматериалом имеется частота отсечки ω_{cut} , определяемая индуктивностью вставок. Если линия длиной l нагружена с обоих концов импедансом $Z(\omega)$, то у получившегося резонатора волновое число k_2 и резонансная частота ω_{res} определяются из дисперсионного уравнения

$$Z(\omega) - jZ_w(\omega) \operatorname{ctg} \left(\frac{k(\omega)l}{2} \right) = 0 \quad Z_w(\omega) = \omega \sqrt{\frac{L_1 L}{\omega^2 L_1 C - 1}} \quad (3)$$

Так, если на концах реализован режим холостого хода $Z = \infty$, то решением дисперсионного уравнения будет $\omega_{res} = \omega_{cut}$, $k_2 = 0$, и поле в линии будет однородно. Если импеданс нагрузки имеет индуктивный характер, то резонансная частота $\omega_{res} > \omega_{cut}$, корень уравнения (3) k_2 действителен (Рис. 1б), распределение

напряжения вдоль линии описывается функцией $\cos(k_2x)$, спадающей от центра к краям. Этот случай аналогичен распределению поля в традиционных тороидальных резонаторах. Если же импеданс нагрузки имеет емкостный характер, то $\omega_{res} < \omega_{cut}$, величина k_2 мнимая, распределение напряжения вдоль линии описывается функцией $\text{ch}(|k_2|x)$, нарастающей к краям. В любом случае введение индуктивностей L1 приводит к понижению модуля волнового числа $|k_2| < |k_1|$ (Рис. 1б) и росту однородности поля.

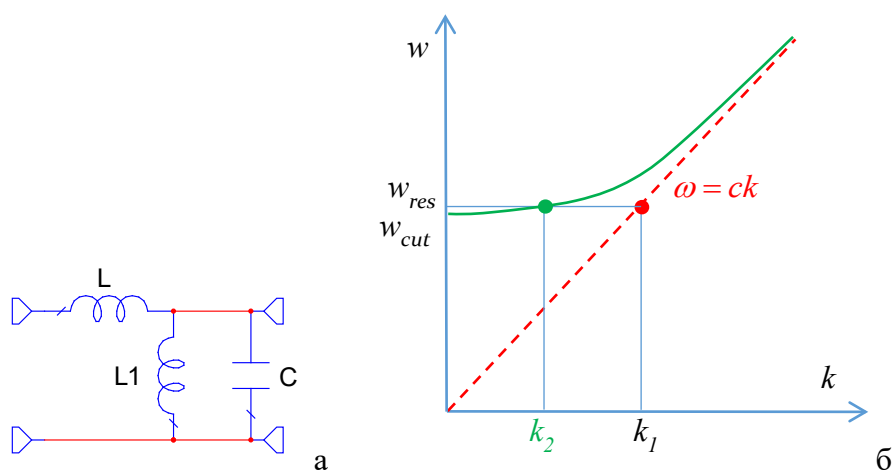


Рисунок 1. а - эквивалентная схема участка линии длиной dx ; б - дисперсионные зависимости волны в линии с метаматериалом (индуктивными вставками L1) – сплошная линия и без индуктивных вставок – пунктир.

3. Резонатор с метаматериалом для клистрона K_a диапазона

В практических конструкциях резонаторов используется массив дискретных индуктивностей. Качественно это не изменит структуру поля по сравнению с рассмотренной выше непрерывной одномерной аналитической моделью. Для миллиметрового диапазона индуктивные вставки должны иметь небольшую индуктивность и могут быть реализованы в виде прямолинейных проводников. В качестве примера рассмотрим безвтулочный прямоугольный 21-лучевой резонатор (Рис. 2а) с размерами $16 \times 16 \times 0.8$ мм. Лучи расположены в области размером 12 мм ($1.5\lambda!$). Период расположения лучей 3 мм, толщина индуктивных вставок составляет 0.5 мм. Частота основной моды составляет 37.74 ГГц. Ближайший высший тип колебаний находится на частоте 39.01 ГГц, разность частот 1.27 ГГц можно полагать достаточной для отсутствия возмущения поля основной моды.

Импеданс взаимодействия ρ в 13 каналах лежит в интервале 3.02-3.13 Ом ($\pm 1.8\%$) и у 8 «угловых» каналов он падает до 2.74 Ом (-22%). Заметим, что индуктивные вставки способствуют локализации электрического поля в области каналов, повышая импеданс взаимодействия.

4. Резонатор с метаматериалом для клистрона S диапазона

Рассмотрим пример построения резонатора с частотой 2.856 ГГц, широко используемой в клистронах для ускорителей электронов (Рис. 3). Низкая рабочая частота требует использования вставок с большой индуктивностью, что невозможно реализовать в случае прямолинейных проводников. Увеличенную индуктивность можно получить в спиральной конструкции, но размещение спиралей между каналами приводит к значительному увеличению диаметра области взаимодействия (и катода), а также к понижению импеданса взаимодействия. Предлагается использовать спирали,

охватывающие каналы, что позволяет обеспечить значительную индуктивность при небольшом увеличении диаметра области взаимодействия. В качестве примера рассмотрим 37-лучевой резонатор (Рис. 3а), в котором каналы образуют плотную гексагональную структуру. Диаметр каналов 7 мм, расстояние между центрами каналов 14 мм, диаметр парциальных эмиттеров 13 мм. Таким образом, диаметр катода составляет 98 мм, а диаметр области взаимодействия 91 мм (0.87λ). Каждый канал имеет индивидуальную индуктивность, охватывающую область пучка, и втулку, которая позволяет снизить поле в области спирали (Рис. 3б). Сечение спирали 0.7×1.5 мм делает возможным эффективное охлаждение спирали на корпус прибора. Спираль может быть прецизионно изготовлена из ленты с помощью лазерной резки.

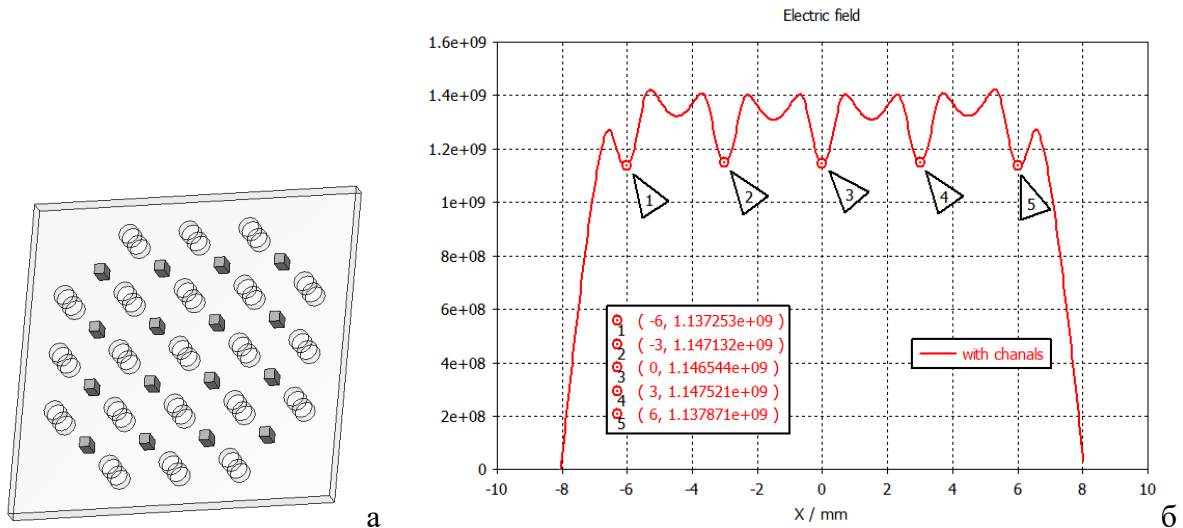


Рисунок 2. а - внешний вид 21-лучевого резонатора Ka диапазона; б - распределение амплитуды продольной компоненты поля в центральной плоскости резонатора. Маркеры указывают положения осей каналов.

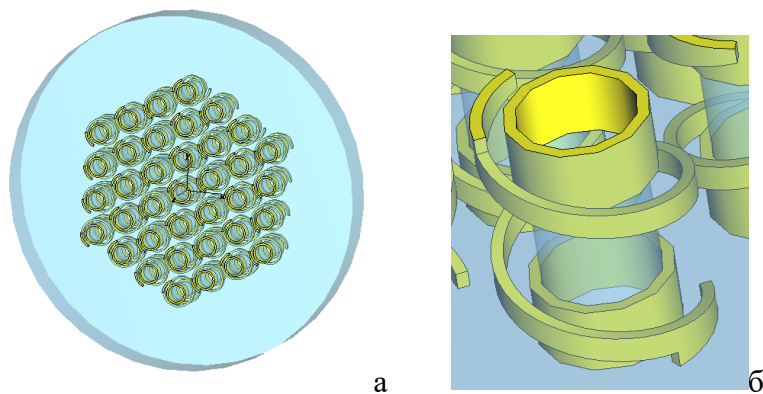


Рисунок 3. Внешний вид 37-лучевого резонатора S диапазона (а); область зазора парциального канала с втулкой и спиралью (б).

Распределение амплитуды электрического поля основной, рабочей моды в центральной плоскости (Рис. 4) демонстрирует высокую однородность поля в каналах.

Импеданс взаимодействия в каналах находится в диапазоне 11.46-11.92 Ом. Ближайший нерабочий вид колебаний находится на частоте 3.11 ГГц. Отстройка составляет 243 МГц (8.5%), что является приемлемым при узкой рабочей полосе частот $\sim 0.2\%$.

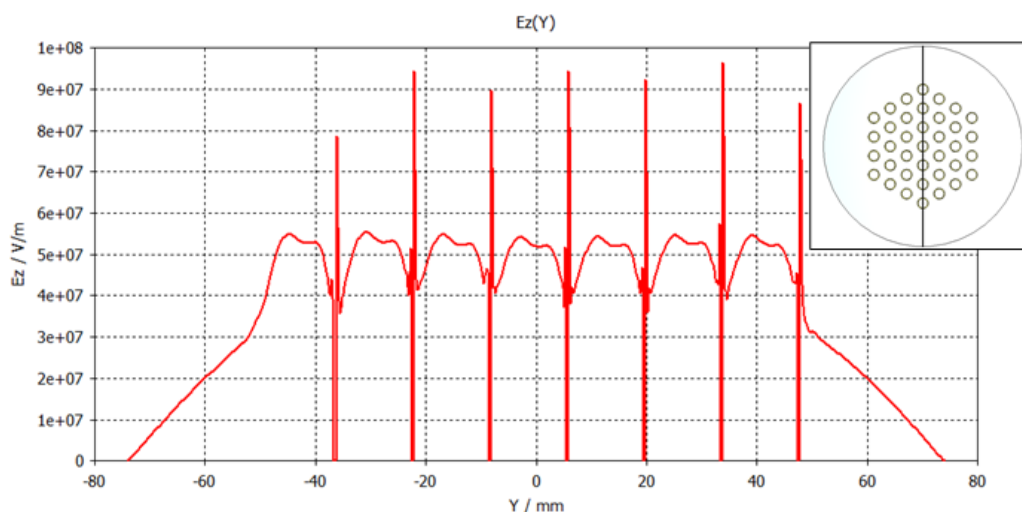


Рисунок 4. Зависимость амплитуды продольной компоненты электрического поля от поперечной координаты Y вдоль диаметра резонатора (см. линию на врезке)

На основе рассмотренных резонаторов был рассчитан клистрон с параметрами, приведенными в таблице

Таблица 2. Параметры образцов

Параметр	Прототип [4; 5]	Предлагаемый вариант
Мощность, МВт	6-7	30
Число лучей	40	37
Ток луча, А	4.75	19.83
Напряжение катода, кВ	52	85
Суммарный ток, А	190	734
Первеанс на луч, мкА/В ^{3/2}	0.40	0.80
Подводимая мощность, МВт	10	62
КПД, %	60	54
Диаметр канала, мм	7	7
Диаметр катода, мм	8.6	13
Плотность тока катода, А/см ²	8.2	14.9

Таким образом, при умеренном увеличении напряжения питания с 52 до 85 кВ и неизменном диаметре катода 98 мм возможно повышение мощности с 7 до 30 МВт за счет некоторого увеличения плотности токоотбора и более полного использования площади катода. При увеличении радиуса катода выигрыш в мощности становится еще более значительным.

5. Заключение

Анализ рассмотренных примеров резонаторов демонстрирует возможность применения метаматериала для значительного расширения области взаимодействия многолучевого клистрона и, следовательно, увеличения мощности (до 30 МВт в S-диапазоне) без увеличения напряжения питания. Количество лучей, ток прибора и мощность растут пропорционально квадрату радиуса области взаимодействия (и радиуса катода), что выгодно отличает эту конструкцию от кольцевых резонаторов, где число лучей пропорционально первой степени радиуса. В отличие от кольцевых резонаторов и резонаторов, работающих на высших видах колебаний (многоствольных), сохраняется возможность расположить лучи вблизи общей оси магнитной системы и обеспечить малый уровень поперечных составляющих магнитного поля и высокое токопрохождение.

Использование метаматериала вполне согласуется с возможностями повышения КПД и мощности прибора путем применения резонаторов, настроенных на высшие гармоники.

Система индуктивных вставок обязательно должна быть периодической, так что в руках разработчика появляется гибкий инструмент управления распределением поля в пространстве взаимодействия.

Список литературы

1. Caryotakis G. High energy microwave device research at the Stanford Linear Accelerator Center // Proceedings International University Conference 'Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies' (Cat. No.99EX356). 1999. - p. 28-31.
2. Caryotakis G. The future of klystrons // Abstracts. International Vacuum Electronics Conference 2000 (Cat. No.00EX392). 2000. - p. 1 pp.
3. Scheitrum G., Caryotakis G., Phillips R., Sprehn D., Fowkes R. High power microwave research at SLAC // IEEE Conference Record - Abstracts. 1996 IEEE International Conference on Plasma Science. 1996. - p. 232.
4. Фрейдович И., Воробьев М. Особенности характеристик кольцевых резонаторов многолучевых клистронов // Электроника. НТБ 1998. No 2.
5. Guzilov I.A., Maslennikov O.Y., Konnov A.V. A way to increase the efficiency of klystrons // 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2013. - p. 1-2.
6. Юнаков А.Н., Пугнин В.И. Проблемы и пути создания мощных широкополосных многолучевых клистронов в средней части сантиметрового диапазона длин волн // Электронная техника, Сер. 1, "СВЧ-техника". 2013. v. 519. No 4. — p. 64-67.
7. Банков С.Е. Электромагнитные кристаллы. — Москва : Физматлит, 2010. — 352.
8. Solyman L., Shamonina E. Waves in Metamaterials. : Oxford University Press Inc., 2009.
9. Давидович М.В., Стефюк Ю.В., Шиловский П.А. Металлические проволочные фотонные кристаллы. Анализ электрофизических свойств // Журнал технической физики. 2012. v. 82. No 3. — p. 7-14.
10. Smirnov A., Newsham D., Yu D. PBG cavities for single-beam and multi-beam electron devices // Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. 2003. v. 2. - p. 1153-1155 Vol.2.
11. Smirnov A.V., Yu D. Rod-Loaded and PBG Multi-Beam Klystron Cavities // Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. 2005. - p. 3094-3096.
12. Царев В.А. Новые фрактальные и фотонно- кристаллические резонаторы для многолучевых вакуумных микроволновых приборов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 2018. No 1. - p. 449-458.