

**К 85-ЛЕТИЮ
Н.И. СИНИЦЫНА**

УДК 621.385.632.1

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛА
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ**

© 2022 г. А. В. Галдецкий*

*Научно-производственное предприятие “Исток” им. А.И. Шокина,
ул. Вокзальная, 2а, корп. 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация*

*E-mail: Galdetskiy@istokmw.ru

Поступила в редакцию 26.04.2022 г.

После доработки 26.04.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Рассмотрено использование в зазоре резонатора многолучевого клистрона метаматериала, состоящего из массива металлических индуктивных вставок, для значительного увеличения площади области взаимодействия. С помощью аналитических оценок и численного моделирования показано, что вставки могут обеспечить увеличение фазовой скорости волны в зазоре, и, следовательно, рост однородности поля, действующего на пучки. Это позволяет увеличивать число лучей, а значит, и мощность клистрона без роста ускоряющего напряжения. Исследованы резонаторы для клистронов S- и K_a-диапазонов.

DOI: 10.31857/S0033849422100023

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области ускорительной физики неразрывно связан с возрастанием мощности источников СВЧ-излучения, в качестве которых традиционно используются клистроны и клистроды (Inductive Output Tube, ИОТ) [1–3]. Как правило, это сопровождается значительным ростом напряжения питания таких приборов, которое в однолучевых лампах достигает уровня нескольких сотен киловольт. Проблема усугубляется необходимостью реализации высокого КПД клистрона, что достигается за счет понижения влияния пространственного заряда и влечет за собой ограничение первеанса электронного пучка на уровне не более ~0.8 мкА/В и подразумевает необходимость повышения напряжения. 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 был успешно реализован в ряде отечественных работ, что позволило достичь уровня выходной мощности 7 МВт при напряжении питания ~60 кВ [4, 5]. В таком клистроне использовались кольцевые резонаторы, работающие на основном, аксиально-симметричном виде колебаний, что обеспечило 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 допустимым радиусом катода и уменьшением частотного разделения рабочего и паразитного видов.

В традиционной конструкции тороидального резонатора число лучей растет пропорционально квадрату радиуса области взаимодействия, но увеличение радиуса ограничивается величиной ~0.21 λ из-за роста неоднородности поля в рабочем зазоре [6]. Таким образом, традиционные конструкции резонаторов клистрона не позволяют дальнейшего увеличения мощности клистрона при ограниченном напряжении питания.

Цель данной работы – поиск возможностей дальнейшего роста мощности, что представляет большой научный и практический интерес.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ В ЗАЗОРЕ ТОРОИДАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Рассмотрим структуру электромагнитного поля в зазоре аксиально-симметричного тороидального резонатора (рис. 1), пренебрегая влиянием каналов на эту структуру. Компонента поля E_z удовлетворяет волновому уравнению

$$(\Delta + k^2)E_z = 0,$$

где $k = \omega/v$ – волновое число. При величине зазора взаимодействия $d \ll \lambda$ можно пренебречь зависимостью E_z от координаты z , и тогда зависимость

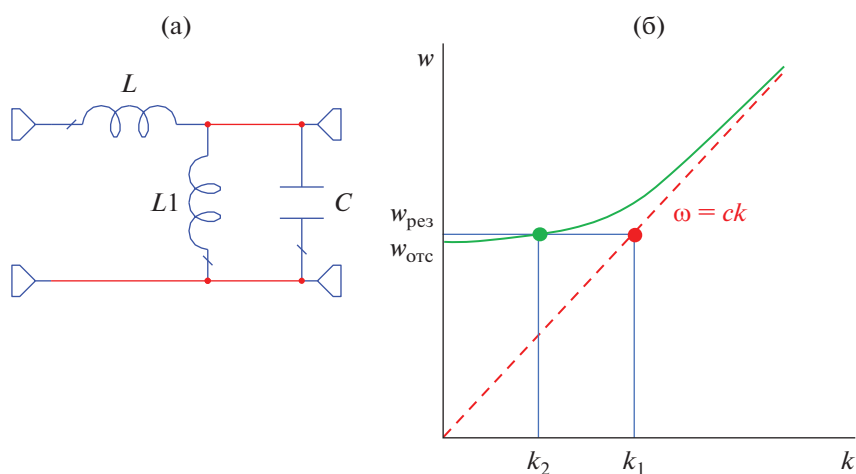


Рис. 1. Эквивалентная схема участка линии длиной dx (а); дисперсионные зависимости волны (б) в линии с метаматериалом (индуктивными вставками $L1$) – сплошная линия, и без индуктивных вставок – штриховая.

поля 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, m – азимутальное число колебания (обычно используются аксиально-симметричные моды с $m = 0$). Это картина радиальной стоячей волны, существующей между двумя проводящими плоскостями зазора взаимодействия. Волновое число k , задающее резонансную частоту ω , определяется фазовой скоростью волны $v = c$ и величиной импеданса, создаваемого внешней, “индуктивной” частью резонатора на краю области взаимодействия. Таким образом, в зазоре структура поля аксиально-симметричного рабочего колебания определяется функцией Бесселя $J_0(kr)$, которая относительно постоянна при $kr \leq 1$, что принципиально ограничивает радиус области взаимодействия R_i

$$R_i \leq 1.3/k \approx 0.2\lambda. \quad (1)$$

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ В ЗАЗОРЕ

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 метаматериала можно использовать периодический или аперидический набор индуктивных элементов (в простейшем случае – прямолинейных проводников), соединяющих противоположные стороны зазора взаимодействия. Свойства такого рода метаматериалов активно изучались многими авторами [7–9], в том

числе в применении к резонаторам клистронов [10–12]. Однако в последнем случае метаматериал использовали 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 (см. рис. 1а) можно получить дисперсионную зависимость:

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

где L (Гн/м), L_1 (Гн м), C (пФ/м) – погонные значения реактивностей линии.

Очевидно, что у линии с метаматериалом имеется частота отсечки $\omega_{отс}$, определяемая индуктивностью вставок L_1 . Если линия длиной l нагружена с обоих концов импедансом $Z(\omega)$, то у получившегося резонатора волновое число k_2 и резонансная частота $\omega_{рез}$ определяются из дисперсионного уравнения

$$Z(\omega) - jZ_W(\omega) \operatorname{ctg} \left(\frac{k(\omega)l}{2} \right) = 0, \quad (3)$$

$$Z_W(\omega) = \sqrt{\frac{L}{C} \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_{отс}^2}}.$$

Так, если на концах реализован режим холостого хода $Z(\omega) = \infty$, то решением дисперсионного уравнения будет $\omega_{рез} = \omega_{отс}$, $k_2 = 0$, и поле в линии будет однородно. Если импеданс нагрузки имеет индуктивный характер, то резонансная частота $\omega_{рез} > \omega_{отс}$,

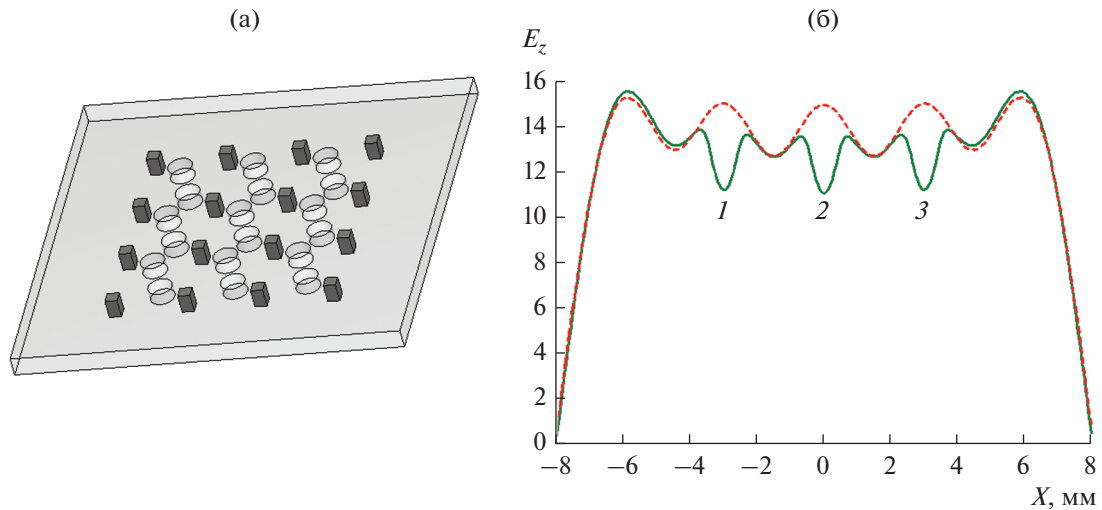


Рис. 2. Внешний вид девятилучевого резонатора K_a -диапазона с метаматериалом (а); распределение амплитуды продольной компоненты поля в центральном сечении резонатора (б) с учетом влияния каналов (сплошная линия) и без него (пунктир); в точках 1, 2, 3, соответствующих осям каналов, поля равны 11.18, 11.04, 11.18 соответственно.

корень уравнения (3) k_2 действителен (см. 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 $\omega_{\text{рез}} < \omega_{\text{отс}}$, величина k_2 мнимая, распределение напряжения вдоль линии описывается функцией $\text{ch}(|k_2|x)$, нарастающей к краям. В любом случае введение индуктивностей L_1 приводит к понижению модуля волнового числа $|k_2| < |k_1|$ (см. рис. 1б) и росту однородности поля.

3. РЕЗОНАТОР С МЕТАМАТЕРИАЛОМ ДЛЯ КЛИСТРОНА K_a -ДИАПАЗОНА

В практических конструкциях резонаторов проще реализовать массив дискретных индуктивностей. Качественно это не изменит структуру поля по сравнению с рассмотренной выше непрерывной одномерной аналитической моделью. Поскольку частота отсечки $\omega_{\text{отс}}$, зависящая от L_1 , должна находиться вблизи рабочей частоты, то согласно (2) для миллиметрового диапазона индуктивные вставки должны иметь небольшую индуктивность и могут быть реализованы в виде прямолинейных проводников. В качестве примера рассмотрим безвтулочный прямоугольный девятилучевый резонатор (рис. 2а), размер которого $16 \times 16 \times 0.8$ мм. Период расположения лучей 3 мм, толщина индуктивных вставок составляет 0.5 мм. Здесь и далее резонатор моделировался численно решением задачи на собственные значения (с помощью решателя Eigenmode Solver). Частота основной моды составляет 37.74 ГГц. На рис. 2б показан профиль ам-

плитуды электрического поля основной моды в центральной плоскости с учетом влияния каналов и без него.

Очевидно, что, несмотря на большой размер области взаимодействия (0.75λ), поля в различных каналах весьма близки. В рассмотренном примере импеданс взаимодействия в каналах ρ находится в диапазоне 2.92...2.99 Ом ($\pm 1.2\%$). Отметим, что индуктивные вставки способствуют локализации электрического поля в области каналов, повышая импеданс взаимодействия ρ .

Ближайший высший тип колебаний находится на частоте 39.01 ГГц, разность частот 1.27 ГГц можно полагать достаточной для отсутствия возмущения поля основной моды.

Из рис. 2б видно, что имеются области значительной величины поля на периферии области метаматериала. Несколько пожертвовав однородностью поля в каналах, можно, не меняя размера резонатора, дополнительно разместить здесь еще 12 каналов – в области размером 12 мм (1.5λ) (рис. 3).

В этом случае импеданс взаимодействия в 13 каналах лежит в интервале 3.02...3.13 Ом ($\pm 1.8\%$) и у восьми “угловых” каналов он падает до 2.74 Ом (-22%).

4. РЕЗОНАТОР С МЕТАМАТЕРИАЛОМ ДЛЯ КЛИСТРОНА S-ДИАПАЗОНА

Рассмотрим вариант построения резонатора с частотой 2.856 ГГц, широко используемой в клистронах для ускорителей электронов (рис. 4). Низкая рабочая частота требует использования вставок с большой индуктивностью, что в случае

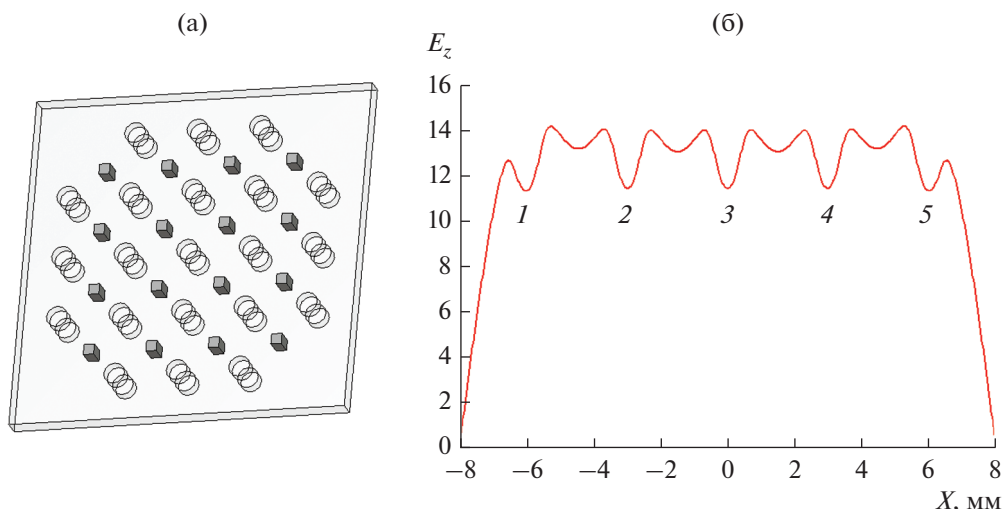


Рис. 3. Внешний вид 21-лучевого резонатора K_a -диапазона (а); распределение амплитуды продольной компоненты поля в центральной плоскости резонатора (б); в точках 1–5, соответствующих осям каналов, поля находятся в интервале 11.37...11.47.

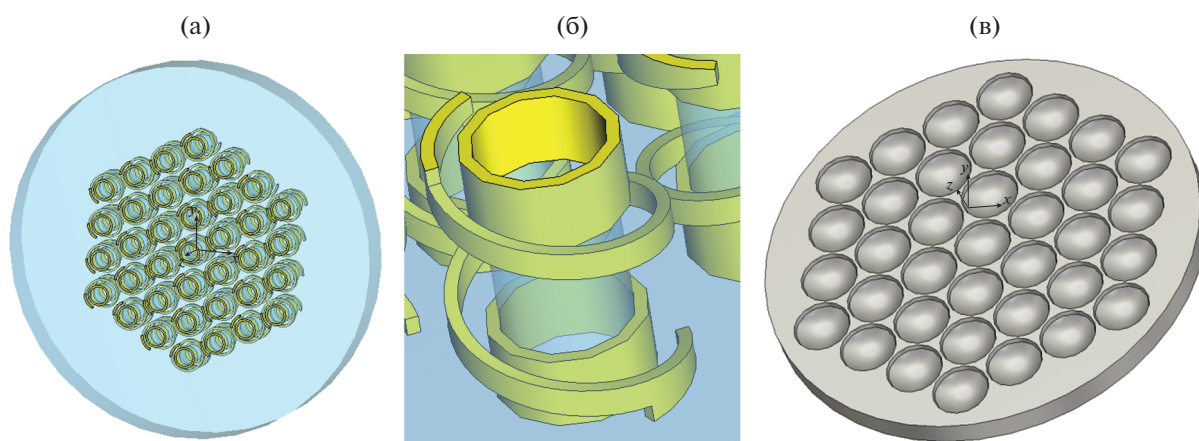


Рис. 4. Внешний вид 37-лучевого резонатора S-диапазона (а); область зазора парциального канала с втулкой и спиралью (б); многолучевой катод (в).

прямолинейных проводников приводит к недопустимо малой толщине 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 (см. рис. 4а), 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 (см. рис. 4б). Сечение спирали 0.7×1.5 мм делает возможным эффективный отвод тепла от нее на корпус прибора. Спираль может быть прецизионно изготовлена из ленты с помощью лазерной резки.

Распределение амплитуды электрического поля основной, рабочей моды в центральной плоскости (рис. 5, б) 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

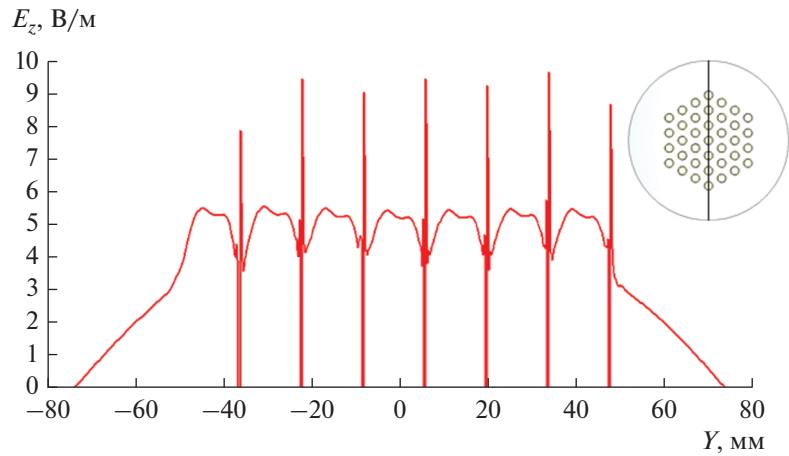


Рис. 5. Зависимость амплитуды продольной компоненты электрического поля от поперечной координаты Y вдоль диаметра резонатора (см. линию на вставке).

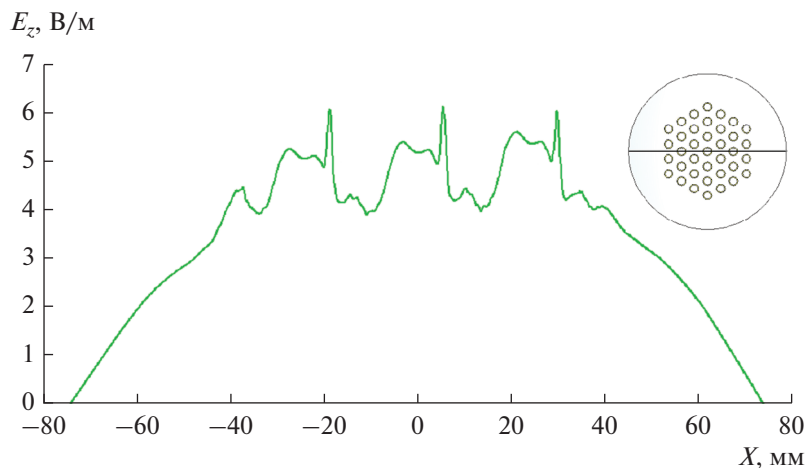


Рис. 6. Зависимость амплитуды продольной компоненты электрического поля от поперечной координаты X вдоль диаметра резонатора (см. линию на вставке).

приемлемым при узкой рабочей полосе частот $\sim 0.2\%$.

5. ВЫВОД ЭНЕРГИИ ИЗ ВЫХОДНОГО РЕЗОНАТОРА

Из-за большой проводимости многолучевого электронного потока сверхмощных клистронов приходится значительно понижать нагруженную добротность выходного резонатора $Q_{\text{нагр}} \approx 25$. Сильная связь с выходным трактом, как правило, приводит к искажению структуры поля рабочей моды, вариации полей, действующих на различные лучи, и понижению КПД и мощности. Отчасти эта трудность преодолевается использованием двух выходных волноводов. В данной работе для выравнивания поля по массиву лучей применены

дополнительные, экранирующие штыри (рис. 7а). Для анализа однородности поля в выходном резонаторе в различные каналы модели введены деветь источников тока (рис. 7б) с равными фазами и амплитудами. Затем моделировалось распределение поля, создаваемого ансамблем токов, и ВЧ-напряжения, которые действуют на каждый из источников.

Распределение поля (рис. 8, 9) подтверждает возможность обеспечения отличной однородности поля при низкой нагруженной добротности резонатора.

Амплитудно-частотные характеристики ВЧ-напряжений, которые “видят” различные источники тока (рис. 10), демонстрируют хорошую идентичность лучей и низкую нагруженную добротность резонатора $Q_{\text{нагр}} \approx 23$.

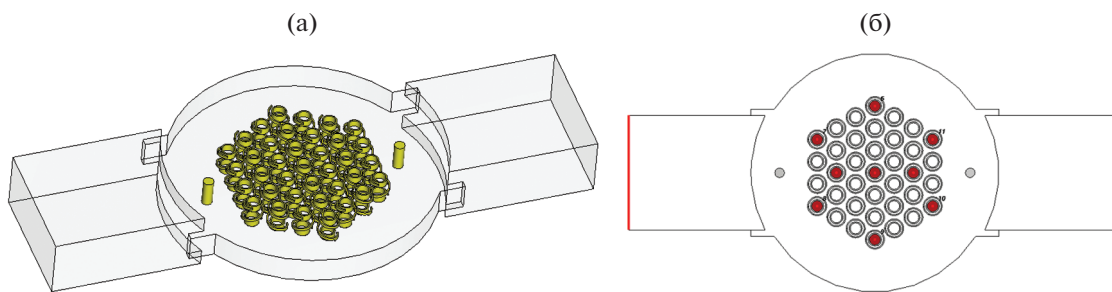


Рис. 7. Внешний вид выходного резонатора с дополнительными штырями и выводом энергии через два волновода (а) и расположение девяти источников тока (б), возбуждающих поле в резонаторе (указаны заливкой).

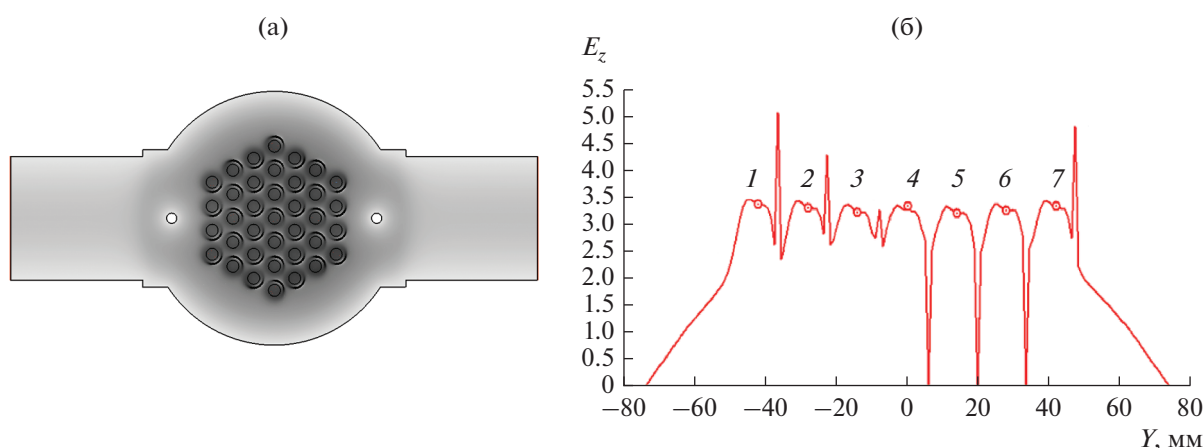


Рис. 8. Распределение поля в выходном резонаторе (а) и зависимость амплитуды продольной компоненты электрического поля в резонаторе от поперечной координаты Y вдоль диаметра резонатора (б) (см. вставку на рис. 5); в точках 1–7, соответствующих осям каналов, поля находятся в интервале 3.21...3.38.

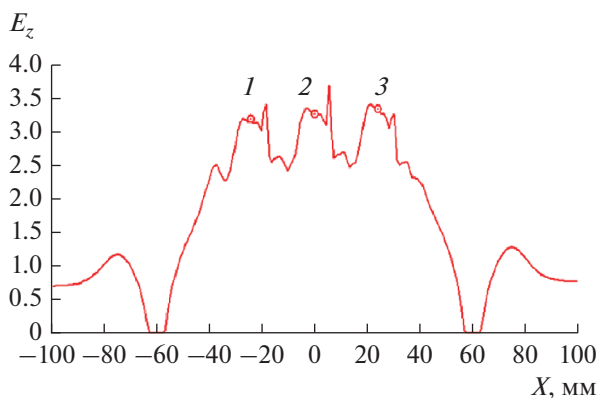


Рис. 9. Зависимость амплитуды продольной компоненты электрического поля в выходном резонаторе от поперечной координаты X вдоль диаметра резонатора (см. вставку на рис. 6).

На основе рассмотренных резонаторов был рассчитан клистрон с параметрами, приведенными в табл. 1.

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 более полного использования площади катода и некоторого увеличения плотности токоотбора.

6. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ИНДУКТИВНЫХ ВСТАВОК

Как правило, клистроны для ускорителей работают с короткими импульсами ~1...2 мкс и высокой скважностью $Q \sim 1000$. Но учитывая высокую импульсную мощность прибора и большую амплитуду СВЧ-токов через индуктивности, анализ теплового режима вставок оказывается весьма важным. В данной работе проведен такой анализ, учитывающий реальное трехмерное распре-

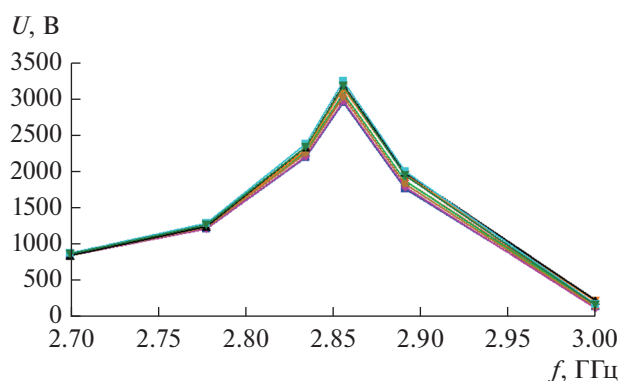


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика ВЧ-напряжений, действующих на источники тока в каналах (см. рис. 7б).

деление СВЧ-токов в спиральных, который показал, что при максимальной выходной мощности разность средних температур между самой горячей точкой спирали и корпусом не превышает 78°C . Изменение температуры в течение импульса также оказывается весьма небольшим (рис. 11).

Отсюда можно заключить, что благодаря достаточному сечению медных спиралей и высокой теплопроводности они эффективно охлаждаются на корпус и их нагрев не представляет проблемы даже при средней мощности клистрона более 30 кВт.

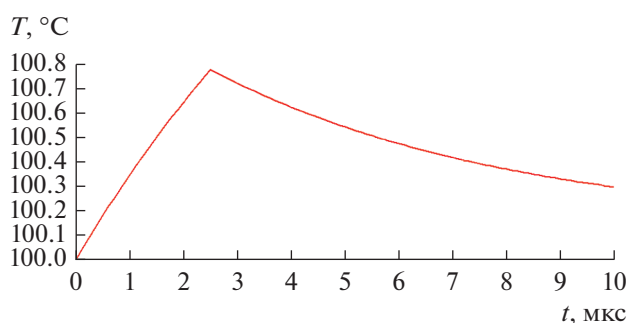


Рис. 11. Зависимость температуры центра спирали от времени при длительности импульса 2.5 мкс.

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), сохра-

Таблица 1. Сравнение характеристик клистрона-прототипа и расчетных параметров предлагаемой конструкции

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

няется 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 необязательно должна быть периодической, так что в руках разработчика появляется гибкий инструмент управления распределением поля в пространстве взаимодействия.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Caryotakis G.* // Proc. Int. Univ. Conf. "Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies". St. Petersburg. 24–28 May 1999. N.Y.: IEEE, 1999. P. 28.
2. *Caryotakis G.* // Abstr. Int. Vacuum Electronics Conf. Monterey 02–04 May 2000. N.Y.: IEEE, 2000. Article No. 847388.
3. *Scheitrum G., Caryotakis G., Phillips R. et al.* // IEEE Conf. Record – Abstr. 1996 IEEE Int. Conf. on Plasma Sci. Boston. 03–05 Jun. N.Y.: IEEE, 1996. P. 232.
4. *Фрейдювич И., Воробьев М.* // Электроника. НТБ. 1998. № 2. С. 9.
5. *Guzilov I.A., Maslennikov O.Y., Konnov A.V.* // 2013 IEEE 14 th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC). Paris. 21–23 May. N.Y.: IEEE, 2013. Article No. 6571181.
6. *Юнаков А.Н., Пугнин В.И.* // Электрон. техника. Сер. 1. "СВЧ-техника". 2013. V. 519. № 4. P. 64.
7. *Банков С.Е.* Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010.
8. *Solytar L., Shamonina E.* Waves in Metamaterials. Oxford: Univ. Press Inc., 2009.
9. *Давидович М.В., Стефюк Ю.В., Шиловский П.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 3. С. 7.
10. *Smirnov A., Newsham D., Yu D.* // Proc. 2003 Particle Accelerator Conf. 2003. Portland. 12–16 May. N.Y.: IEEE, 2003. V. 2. P. 1153.
11. *Smirnov A.V., Yu D.* // Proc. 2005 Particle Accelerator Conf. Knoxville. 16–20 May. N.Y.: IEEE, 2005. P. 3094.
12. *Tsarev V.A.* // Proc. 2018 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2018). Saratov. 27–28 Sept. N.Y.: IEEE, 2018. P. 449.