

водит к уменьшению качества компенсации, которое также наблюдается при увеличении интенсивности искажений.

Увеличение эффективности без повышения быстродействия управления может быть получено при смещении опорного пучка в наветренную сторону.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канев Ф.Ю., Макенова Н.А., Пустынников С.В., Цыро Е.А. Амплитудно-фазовое управление лазерным пучком. Ч. 1. Формирование амплитудного распределения // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 115–119.
2. Samarkin V., Aleksandrov A., Kudryashov A. Novel wavefront correctors based on bimorph elements // Proc. of the 3-rd Intern. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. – Beijing, China, 2002. – P. 171–178.
3. De Lima Montero D.W., Vdovin G., Sarro M. Integration of a Hartmann-Shack wavefront sensor // Proc. of the 2-nd Intern. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. – Durham, Great Britain, 1999. – P. 215–220.
4. Малафеева И.В., Тельпуховский И.Е., Чесноков С.С. Симплекс-метод в задаче динамической коррекции теплового самовоздействия световых пучков при флуктуациях параметров среды на трассе // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5. – № 12. – С. 1241–1251.

Поступила 20.03.2009 г.

УДК 621.385.69

### КОАКСИАЛЬНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ ТРИОД С РАДИАЛЬНО-РАСХОДЯЩИМСЯ ПУЧКОМ

В.П. Григорьев, Т.В. Коваль, Г.В. Мельников, Р.Р. Рахматуллин

Томский политехнический университет  
E-mail: grig@am.tpu.ru

*Рассмотрено стационарное состояние электронного потока и формирование виртуального катода в коаксиальном отражательном триоде с радиально расходящимся пучком в широком диапазоне ускоряющих напряжений. Проведено моделирование формирования виртуального катода методом крупных частиц. Получена зависимость инкремента возбуждаемых колебаний и эффективности излучения от геометрии диода, внешнего напряжения и импеданса резонансной камеры. Показано, что в коаксиальном триоде наибольший инкремент взаимодействия пучка имеет место с волной TEM типа. Определена область геометрических размеров коаксиальной системы, где может осуществляться наиболее эффективное возбуждение электромагнитных колебаний на TEM моде.*

#### Ключевые слова:

Коаксиальный диод, отражательный триод, виртуальный катод, поле пространственного заряда, электронный пучок.

Отражательные триоды с виртуальным катодом (ВК) являются генераторами микроволнового излучения в сантиметровом диапазоне частот и уровнем мощности десятки мегаватт. Одним из достоинств является возможность использования всего тока пучка, что обеспечивает получение высокого уровня мощности излучения в таких генераторах. Эти приборы отличаются конструктивной простотой, компактностью и отсутствием внешнего магнитного поля [1]. Все это определяет повышенный интерес к таким системам.

Наиболее полно указанные преимущества могут быть реализованы в триодах коаксиального типа. На возможность генерации в таких системах с радиально сходящимся пучком было указано в теоретических [2] и экспериментальных [3] работах, хотя полученная мощность излучения была сравнительно не высока (до 120 МВт). Достигнутый уровень мощности объяснялся далеко не оптимальными параметрами системы. Как показывают исследования стационарных состояний коаксиальных триодов различной геометрии [4] более пред-

почтительно использовать триоды с расходящимся электронным пучком. Весьма привлекательной представляется возможность генерации в таких приборах бездисперсионной TEM-моды, для которой можно эффективно использовать согласующие элементы, рассчитанные на узкую полосу частот.

В данной работе исследуется стационарное состояние электронов и возбуждение электромагнитных колебаний в коаксиальном отражательном триоде с радиально расходящимся электронным пучком.

#### Стационарное состояние электронов в коаксиальном отражательном триоде

В литературе вопросы стационарных состояний коаксиальных диодов наиболее полно рассмотрены для нерелятивистских ускоряющих напряжений [5]. В существующих работах полностью отсутствует анализ положения ВК, либо он проведен при постоянной энергии электрона, что является достаточно грубым приближением [7]. Нами про-

ведено исследование стационарного состояния электронного потока и образования ВК в коаксиальном триоде для расходящегося электронного потока в широкой области ускоряющих напряжений, включая слабoreлятивистские.

Схема триода в цилиндрической системе координат  $(r, \theta, z)$  представлена на рис. 1, где  $R_k, R_a, R_{VC}, R_c$  – радиусы катода, анода, положения виртуального катода и резонансной камеры. В такой системе анод разделяет пространство на два резонансных объема (I и II) с различными собственными частотами и типами колебаний.

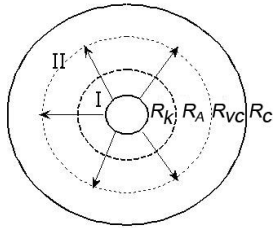


Рис. 1. Схема отражательного триода с расходящимся пучком

Стационарное состояние электронного потока в коаксиальной системе с радиально расходящимся пучком во всем диапазоне ускоряющих напряжений описывается уравнением Пуассона [5]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \gamma}{\partial r} \right) = \tilde{J} \frac{\gamma}{r \sqrt{\gamma^2 - 1}}, \quad (1)$$

с граничными условиями:  $\gamma(r)|_{r=R_k}=1$  и  $(\partial\gamma/\partial r)|_{r=R_k}=0$ , отражающими нулевую скорость электронов на катоде и бесконечную эмиссионную способность катода. Здесь  $\gamma=1+eU/m_0c^2$  – относительная энергия электронов,  $U$  – ускоряющее напряжение,  $\tilde{J}=-2J/I_A$  – относительная плотность тока  $J=2\pi en_0 v r = -2\pi r j_r$ ,  $j_r$  – радиальная составляющая плотности тока электронов в диоде,  $I_A=17$  кА – ток Альфвена,  $e$  и  $m_0$  – заряд и масса электрона,  $c$  – скорость света.

В пределе низких ускоряющих напряжений ( $\gamma-1 \ll 1$ ) реализуется нерелятивистский случай и для  $|\ln(R_a/R_k)| \ll 1$  из решения ур. (1) следует известный закон Чайлда-Ленгмюра для плоского диода [5].

Отметим, что в приведенных выше уравнениях не учитываются эффекты, обусловленные собственными магнитными полями пучка. Эти эффекты в реальной коаксиальной системе могут быть важны для длинных высоковольтных диодов, где их влияние приведет к фокусировке пучка по координате  $z$ . Что касается отражательных триодов, то здесь следует ожидать значительное ослабление этих эффектов из-за наличия тока отраженных от ВК электронов, нейтрализующего прямой ток.

Исследование тока в диоде и положение виртуального катода при различных ускоряющих напряжениях в зависимости от кривизны системы (рис. 1) проведено на основе численного решения ур. (1). На рис. 2 показана зависимость тока  $I=\tilde{J}d$  от кривизны  $S=R_a/R_k$  для диодного промежутка  $d=2$  см. Увеличение тока диода будет происходить с ростом ускоряющего напряжения. При этом, как

показали численные расчеты, релятивистскими факторами можно пренебречь при  $\tilde{J} < 0,1$ .

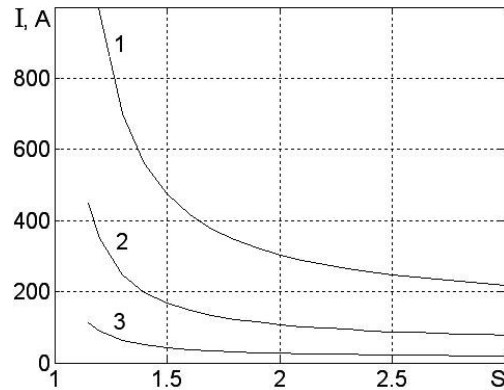


Рис. 2. Зависимость  $I=\tilde{J}d$  от кривизны  $S$  для разных значений относительной энергии  $\gamma$ : 1) 1,10; 2) 1,05; 3) 1,02

Особый интерес в отражательных триодах представляет определение местоположения ВК, так как частота колебаний электронов зависит от формы потенциальной ямы, формируемой между реальным и виртуальным катодами. Для этого решались две задачи: прямая – для диодного промежутка реальный катод-анод, и при определенном токе обратная задача – для промежутка ВК-анод в предположении бесконечной эмиссионной способности ВК. Результаты местоположения виртуального катода в отражательных триодах с учетом прозрачности анода  $\chi$  [1], представлены на рис. 3.

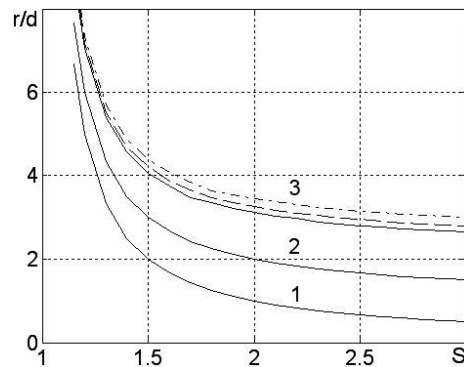


Рис. 3. Зависимости относительных радиусов катода (1), анода (2) и ВК (3) от параметра кривизны для разной прозрачности анода: кривая (сплошная линия) –  $\chi=1,0$ ; (пунктирная линия) –  $\chi=0,8$ ; (штрих-пунктирная линия) –  $\chi=0,6$

### Моделирование формирования виртуального катода

Численное исследование формирования виртуального катода и квазистационарного состояния осуществлялось методом крупных частиц. На рис. 4 показан фазовый портрет электронного пучка для параметров:  $U=450$  кВ,  $d=2$  см,  $R_k=4$ ,  $R_a=5,5$  см, высота катода 8 см, высота камеры 60 см,  $\chi=0,8$ .

На рис. 5 показано распределение плотности электронов пучка вдоль продольной координаты на разных радиусах. Из рисунка видно, что плотность на краях пучка ниже, чем в центре.

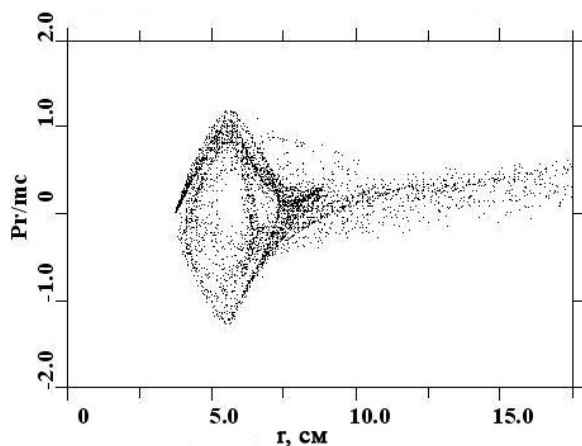


Рис. 4. Фазовый портрет пучка,  $P_r = mv_r \gamma$

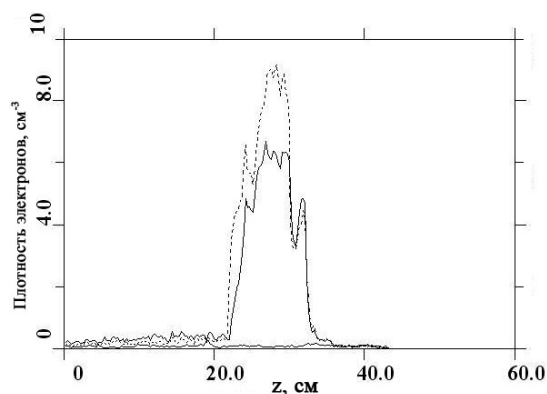


Рис. 5. Распределение плотности пучка электронов вдоль продольной координаты на радиусе  $r=5$  см (пунктирная линия),  $r=6$  см (сплошная линия)

Численные исследования показали, что в коаксиальном триоде, так же как и в плоском отражательном триоде [8], ток пучка, координаты виртуального катода и центра тяжести пучка носят колебательный характер. Частота этих колебаний зависит от ускоряющего напряжения, диодного зазора и прозрачности анода.

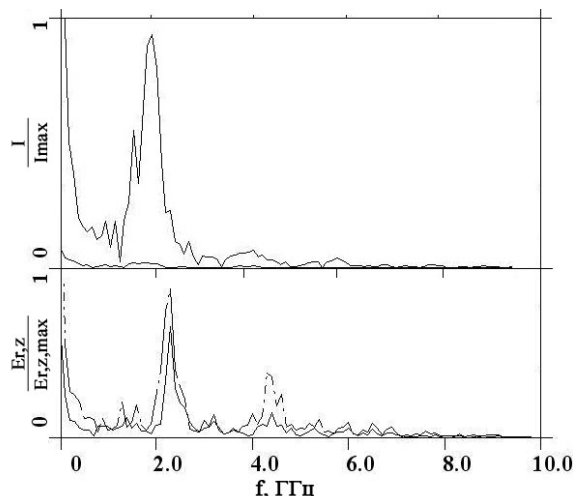


Рис. 6. Спектры тока пучка на радиусе 6 см и электрического поля в точке  $(r, z) = (12, 24)$  см:  $E_r$  – сплошная линия,  $E_z$  – пунктирная линия

На рис. 6 показаны спектры частот тока пучка и электрического поля в коаксиальном отражательном триоде. Вторая гармоника в спектре электрического поля указывает на то, что колебания виртуального катода содержат гармоники частоты колебаний электронов пучка [8]. Частота плазменных колебаний  $\omega_p = (4\pi en_b/m_0)^{1/2}$  связана со средней плотностью электронов пучка  $n_b$  в области анод – ВК. Для  $n_b = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  (рис. 5) частота колебаний  $\approx 2$  ГГц, что согласуется с основной гармоникой в спектрах на рис. 6.

#### Дисперсионное уравнение

Неустойчивость электронного потока в коаксиальной системе с ВК, приводящая к возбуждению электромагнитных колебаний, исследовалась методом кинетического уравнения.

В коаксиальном отражательном триоде при формировании ВК осциллирующие электроны совершают нелинейные колебания в потенциальной яме с частотой  $\omega$ , определяемой величиной ускоряющего потенциала, плотностью заряда и геометрией системы. Радиальное движение электронов относительно минимума потенциала (анода) можно представить как движение нелинейных осцилляторов  $r = R_A + a \sin \varphi$  на двух частотах  $\Omega_r(a_r)$ , определяемых в промежутках фазы  $(0, \pi)$  и  $(\pi, 2\pi)$ .

Принимая во внимание несимметричность потенциальной ямы, проводя разложение полей по гармоникам  $\exp(i\ell\varphi - i\omega t)$ , из кинетического уравнения для функции распределения электронов в области катод-ВК было получено дисперсионное уравнение, описывающее возбуждение электромагнитных колебаний в объемах I и II. Из анализа дисперсионного уравнения следует, что возбуждение когерентных колебаний электронного потока происходит на частоте, близкой к частоте колебаний электронов  $\Omega$  в потенциальной яме. На этой же частоте возбуждаются электромагнитные колебания и колебания виртуального катода. При малых разбросах электронов по амплитудам колебаний возбуждение электромагнитных колебаний на собственных частотах резонатора происходит с инкрементом:

$$\zeta = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \frac{1}{2} \Lambda Z(\chi, \frac{k_{\perp}}{k_v}, R_A, R_C) |K| \right]^{1/3} \Omega - \frac{\Omega}{6Q_v}. \quad (2)$$

Здесь  $\Lambda = \frac{e^2 n_b^2}{\gamma_0 m_0 \Omega^2}$ ,  $K = \left( \frac{\partial \Omega}{\partial \chi} \right)_0 \frac{c^2}{\Omega^3}$ ;  $K$  – пара-

метр нелинейности;  $\chi = a^2$  – квадрат средней амплитуды;  $\gamma_0$  – относительная энергия электронов на аноде;  $\omega_v = ck_v = c(k_{\perp}^2 + k_z^2)^{1/2}$  собственная частота резонансного объема (I или II),  $Q_v$  – добротность;  $Z(\chi_0, k_{\perp}/k_v, R_A, R_C) = -i8\pi^2 \rho_c G_v(k_{\perp}/k_v, R_A, R_C)$  – импеданс резонансной камеры;  $G_v$  – функция, описывающая распределение ТЕМ, Е, и Н волн в резонансной камере;  $\rho_c$  – распределение плотности заряда пучка электронов.

Инкремент возбуждаемых колебаний (2), и соответственно эффективность излучения, зависят от

геометрии диода, внешнего напряжения и импеданса резонансной камеры. Резонансный импеданс существенно зависит от типа возбуждаемой моды и геометрии системы.

В объеме П возможно существование Е, Н и ТЕМ волн. Наибольший интерес представляют низшие типы волн. Это связано с тем, что передача энергии волны низшего типа направляющей системе обеспечивается наиболее просто. Волна низшего типа имеет наименьший уровень шумов в точке приема сигнала. Поскольку у волны ТЕМ критическая частота равна нулю, то она является низшим типом колебаний. Первым низшим типом Н-волн в коаксиальной линии при любом диаметре и конфигурации внутреннего проводника является волна  $H_{11}$ .

Численное исследование электродинамических характеристик коаксиального резонатора показывает, что структура собственного электромагнитного поля не меняется при изменении радиусов анода и камеры. Однако поле в области пучка, а значит и уровень взаимодействия пучка с волной, зависят от геометрических размеров коаксиального резонатора. Зависимость импеданса системы от геометрии системы и типа возбуждаемой моды описывает функция  $G_v(k_{\perp}/k_v, R_A, R_C)$ , численное исследование которой показало, что наибольшие значения имеют низшие типы волн ТЕМ,  $H_{11}$  и  $E_{01}$ . Исследование функции  $G_v$  для этих типов волн от геометрии резонансной системы представлено на рис. 7, 8.

На рис. 7 показаны зависимости функции  $G_v$  от радиуса анода  $R_A$  при  $R_C=0,175$  м. Из рис. 7 видно, что независимо от диодного промежутка ТЕМ волна имеет более высокий уровень функции  $G_v$  (инкремента), чем у волн  $H_{11}$  и  $E_{01}$  и эта разница увеличивается в увеличении радиуса анода, т. е. с уменьшением расстояния  $R_A-R_C$ . Это связано с увеличением напряженности электрического поля вблизи внутреннего проводника при уменьшении расстояния между проводниками, т. е. в области пучка, что обуславливает наибольший инкремент неустойчивости на этой волне.

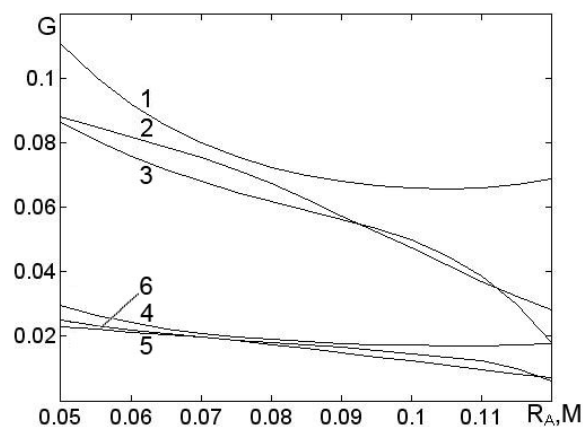


Рис. 7. Зависимость функции  $G_v$  от радиуса анода для ТЕМ (кривые 1, 4),  $H_{11}$  (кривые 2, 5) и  $E_{01}$  (кривые 3, 6) типов волн; 1, 2 и 3 -  $d=2$  см; 4, 5 и 6 -  $d=1$  см

На рис. 8 показаны зависимости функции  $G_v$  от радиуса камеры  $R_C$  для типов волн ТЕМ,  $H_{11}$  и  $E_{01}$  при  $R_A=0,05$  м. Как и в предыдущем случае, ТЕМ волна будет иметь более высокий инкремент, чем волны  $H_{11}$  и  $E_{01}$ . Как следует из рис. 7, 8, волна  $E_{01}$  имеет значительно более низкие значения инкремента при уменьшении расстояния  $R_A-R_C$ , а именно при  $R_A-R_C < 0,07$  м.

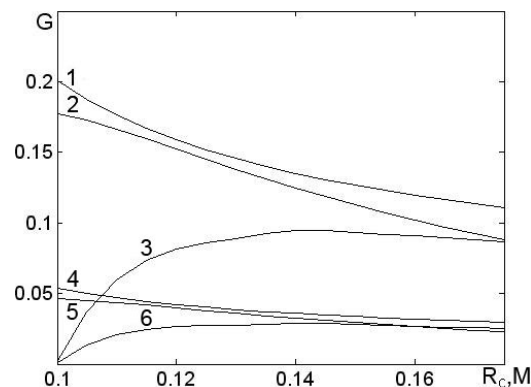


Рис. 8. Зависимость функции  $G_v$  от радиуса камеры для ТЕМ (кривые 1, 4),  $H_{11}$  (кривые 2, 5) и  $E_{01}$  (кривые 3, 6) типов волн; 1, 2 и 3 -  $d=2$  см; 4, 5 и 6 -  $d=1$  см

Следует отметить, что в коаксиально-симметричном пучке может преимущественно развиваться неустойчивость на ТЕМ моде, т. к. мода  $E_{01}$  имеет более низкий инкремент. Волна  $H_{11}$  в этом случае может возбуждаться только за счет неустойчивости в пучке по углу, которая будет подавляться при разбросе электронов по амплитудам. Таким образом, в коаксиальном отражательном триоде с расходящимся пучком может эффективно возбуждаться неустойчивость на ТЕМ моде.

### Выводы

Проведено исследование стационарного состояния электронного потока и образования виртуального катода в коаксиальном триоде для расходящегося электронного потока в широкой области ускоряющих напряжений, включая слабoreлятивистские. Получена зависимость радиуса образования ВК от параметров триода и ускоряющего напряжения.

Проведено моделирование формирования ВК методом крупных частиц. Показано, что частота колебаний положения ВК, токов и полей зависит от плотности электронов пучка.

Получена зависимость инкремента возбуждаемых колебаний, и соответственно эффективности излучения от геометрии диода, внешнего напряжения и импеданса резонансной камеры.

Показано, что в коаксиальном триоде наибольший инкремент взаимодействия пучка имеет место с волной ТЕМ типа. Определена область геометрических размеров коаксиальной системы, где может осуществляться наиболее эффективное возбуждение электромагнитных колебаний на ТЕМ моде.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. Генерация электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // В сб.: Плазменная электроника / Под ред. В.И. Курилко. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 112–131.
2. Григорьев В.П. Электромагнитное излучение в коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64. – № 7. – С. 122–129.
3. Антошкин М.Ю., Григорьев В.П., Коваль Т.В. Численная модель для исследования возбуждения аксиально-несимметричных волн в коаксиальных виркаторах // Радиотехника и электроника. – 1995. – № 8. – С. 1300–1305.
4. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Курьяков А.М. Усиление электромагнитных волн в коаксиальном триоде с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. – 1995. – № 9. – С. 1422–1427.
5. Langmuir I., Blodgett K.B. Currents limited by space charge between coaxial cylinders // Phys. Rev. – 1923. – V. 22. – P. 347–356.
6. Wheeler C.B. Space charge limited current flow between coaxial cylinders at potentials up to 15 MV // J. Phys. A: Math. Gen. – 1977. – V. 10. – № 4. – P. 631–636.
7. Рухадзе А.А., Рыбак П.В., Ходотаев Я.К., Шокри В. О предельных токах электронных пучков в коаксиальных системах // Физика плазмы. – 1996. – Т. 22. – № 4. – С. 358–366.
8. Григорьев В.П., Коваль Т.В. Теория генерации электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 4. – С. 169–182.

Поступила 02.04.2009 г.

УДК 621.372.81

## КОАКСИАЛЬНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ В КОМПРЕССОРАХ СВЧ ИМПУЛЬСОВ

С.Н. Артеменко, С.А. Новиков, Ю.Г. Юшков

Томский политехнический университет

E-mail: novsa@el.ti.tpu.ru

*Проведен анализ работы коаксиальных СВЧ компрессоров, принцип действия которых основан на резонансном усилении электромагнитного поля с последующим быстрым выводом энергии в виде мощных наносекундных СВЧ импульсов. Переключение компрессора из режима накопления в режим вывода энергии осуществляется с помощью СВЧ разряда, зажигаемого в емкостном зазоре в центральном проводнике коаксиального резонатора. Экспериментально показано, что в метровом и 30-см диапазонах длин волн такие компрессоры позволяют получать радиоимпульсы с длительностью до 2...3 периодов высокочастотного поля. Приведены результаты исследования работы компрессоров с максимальной частотой следования импульсов. При продувке газа в разрядном промежутке компрессор мог работать с частотой следования до 20 кГц.*

### Ключевые слова:

*Излучение, СВЧ, коаксиальный резонатор, компрессор, импульс, усиление, мощность, энергия, разряд.*

Мощность излучения СВЧ источников можно увеличить за счет уменьшения длительности выходных импульсов при временной резонансной компрессии, принцип действия которой основан на накоплении высокочастотной энергии в волноводных резонаторах с последующим быстрым выводом энергии в виде СВЧ импульсов наносекундной длительности [1]. При подключении отдельных систем компрессии, изготовленных из стандартных прямоугольных, круглых или коаксиальных волноводов, к выходу промышленных магнетронов 3-х, 10-ти и 30-см диапазонов длин волн было получено усиление мощности в 50, 100 и 150 раз соответственно. Наибольшее усиление и наиболее короткие импульсы длительностью, равной нескольким периодам высокочастотного поля, были получены при использовании коаксиальных резонансных систем. Это связано с тем, что в отличие от полых волноводов коаксиальные линии более широкополосные и позволяют пропускать СВЧ импульсы без искажения во время их формирования и вывода из компрессора. В данной статье при-

ведены анализ работы и конструкция коаксиального СВЧ компрессора, а также результаты экспериментов, связанных с получением наиболее коротких сверхширокополосных импульсов и повышением частоты следования импульсов до 20 кГц.

Для накопления энергии в коаксиальном СВЧ компрессоре было предложено использовать резонатор, выполненный в виде Т-образного тройника с двумя закороченными плечами, рис. 1. Во время накопления энергия не излучается через боковое плечо – 3, т. к. его вход находится в минимуме стоячей волны, образующейся вдоль резонатора, включающего в себя плечи тройника – 1 и 2. Вывод энергии осуществляется за счет изменения фазы отраженной волны от одного из концов резонатора. Для этого в одно из короткозамкнутых плеч резонатора включалась емкость, выполненная в виде зазора – 4 в центральном проводнике коаксиальной линии. При расчете электрической длины плеча – 2 учитывалась инверсия фазы, создаваемая этой емкостью.