

УДК 537.862

**ИССЛЕДОВАНИЕ САМОСОГЛАСОВАННОЙ
ДИНАМИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ТРИОДАХ
С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ**Т.В. Коваль, В.В. Офицеров, Д.С. Обухов,
А.Л. МарченкоИнститут кибернетики ТПУ
E-mail: tvkoval@mail.ru

Построена математическая модель макрочастиц, описывающая самосогласованную динамику электронного пучка в сильноточных системах с виртуальным катодом в приближении аксиальной симметрии процессов. Разработанный вычислительный алгоритм реализован в виде комплекса программ с использованием инструментария математического пакета MatLab. Проведено моделирование динамики формирования виртуального катода, исследованы вольтамперные и частотные характеристики отражательных триодов с различной конфигурацией электродов.

Ключевые слова:

Сильноточный электронный пучок, отражательный триод, эмиссия частиц, виртуальный катод, амплитудно-частотная характеристика, предельный ток, ускоряющее напряжение.

Введение

Отличительной особенностью систем с виртуальным катодом (ВК) является способность генерировать электромагнитные колебания только при токах пучка выше предельного. Поэтому на основе систем с виртуальным катодом создают мощные сильноточные СВЧ приборы [1–3]. В настоящее время существует несколько разновидностей устройств с виртуальным катодом. Одним из таких является отражательный триод. Отражательный триод относится к классу СВЧ приборов с виртуальным катодом, в которых отсутствуют

пролетные частицы, электроны пучка совершают колебательное движение между реальным и виртуальным катодами.

Эффективное преобразование энергии электронного потока в электромагнитное излучение происходит в основном в области анод-ВК [4–6]. Мощность излучения в отражательных триодах с ВК определяется резонансным взаимодействием осциллирующих электронов и колебаниями ВК. При этом на мощность излучения существенно влияет глубина модуляции электронного пучка по фазе колебаний, которая самосогласованно связана с амплитудой колебаний и конфигурацией ВК [7]. Следует отметить, что частота колебаний электронов, а также частота колебаний ВК не зависят от электродинамической структуры отражательного триода, а определяются плотностью заряда электронов в области взаимодействия, конфигурацией электронного пучка и диодного промежутка. Таким образом, динамика и формирование ВК оказывают существенное влияние на мощность излучения. Поэтому исследование динамики формирования колебательного процесса виртуального катода в различных схемах отражательных триодов в за-

Коваль Тамара Васильевна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ.

E-mail: tvkoval@mail.ru

Область научных интересов: генерация мощных электромагнитных импульсов, коллективные взаимодействия в пучках заряженных частиц.

Офицеров Владимир Викторович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ.

E-mail: ofivlad@gmail.com

Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов.

Марченко Александр Леонидович, аспирант кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ.

E-mail: tenorasp@mail.ru

Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов.

Обухов Дмитрий Сергеевич, магистрант кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ.

E-mail: obukhovds@gmail.com

Область научных интересов: математическое моделирование физических процессов.

висимости от размеров сечения электронного пучка и величины межэлектродного промежутка представляет самостоятельный научный интерес. Изучение поставленных вопросов проводится на основе численного моделирования методом макрочастиц в приближении аксиальной симметрии ($\partial/\partial\theta = 0$) в цилиндрической системе координат (r, θ, z) .

Целью данной работы является моделирование динамики формирования виртуального катода пучка в отражательных триодах различной конфигурации электродов (рис. 1). В работе рассмотрена потенциальная задача с целью изучения влияния геометрии системы на формирование ВК, а также на вольтамперные и частотные характеристики прибора.

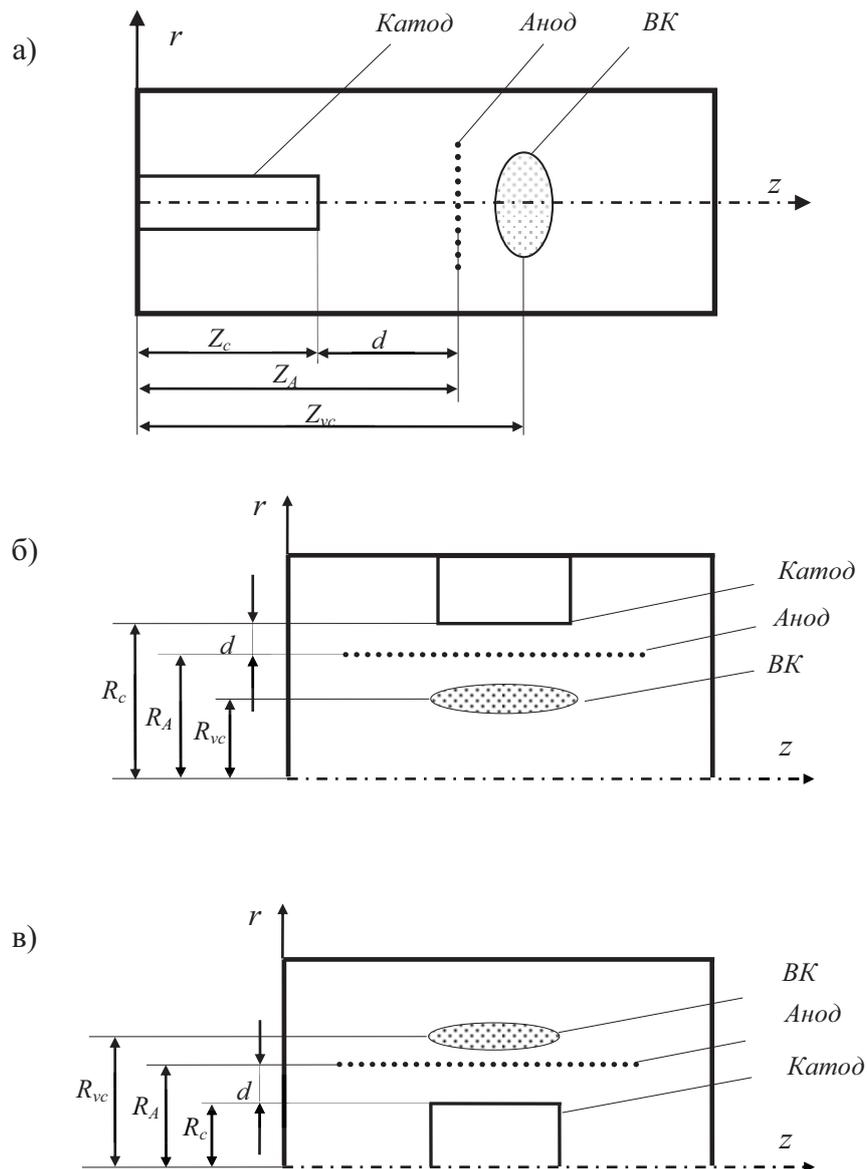


Рис. 1. Схемы отражательных триодов: а) триод с планарной конфигурацией электродов; б) коаксиальный триод с радиально-сходящимся пучком; в) коаксиальный триод с радиально-расходящимся пучком

Математическая модель

Для исследования процессов в сильноточных пучках используется метод макрочастиц [8], который является наиболее универсальным и широко применяется для исследования мно-

гомерной динамики сильноточных пучков, а также физических процессов, протекающих в системах с ВК [1, 2, 6].

Динамика электронного пучка с учетом собственного электромагнитного поля описывается следующей самосогласованной системой уравнений [9–10]:

1. Уравнение Пуассона для потенциалов:

$$\Delta\Phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \Delta\vec{A} = -\mu_0\vec{J}, \quad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа; $\Phi(\vec{x}, t)$ и $\vec{A}(\vec{x}, t)$ – потенциалы собственного поля пучка; $\rho(\vec{x}, t)$ и $\vec{J}(\vec{x}, t)$ – плотности заряда и тока пучка.

2. Уравнения динамики частиц пучка:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\{\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]\}, \quad (2)$$

где \vec{x} – координаты частицы; \vec{v} – скорость частицы; \vec{p} – импульс частицы; e – элементарный заряд; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{B} – индукции магнитного поля. Связь напряженности электрического поля, индукции магнитного поля и потенциалов определяется уравнениями:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} \Phi, \quad (3)$$

$$\vec{B} = -\text{rot } \vec{A}. \quad (4)$$

Система замыкается уравнением непрерывности, связывающим плотности заряда и тока пучка:

$$\text{div } \vec{J} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Решение самосогласованной системы уравнений (1)–(5) методом макрочастиц с заданными начальными и граничными условиями, которые определяются параметрами конкретного типа отражательного триода, позволяет исследовать круг поставленных задач.

К настоящему моменту созданы комплексы вычислительных программ, позволяющие проводить самосогласованное моделирование динамики электронов в таких приборах, которые используют разностный метод решения уравнения Максвелла на сетке в практически любой трехмерной геометрии прибора, и релятивистский вариант метода макрочастиц. Среди них можно назвать «KARAT», «MAGIC», «QUICKSILVER» [2]. В данной работе моделирование процессов проводится путем численного решения системы уравнений (1)–(5) в пакете MatLab. Пакет MatLab выбран исходя из универсальности его вычислительных и программных средств, а также удобного графического интерфейса для представления результатов моделирования.

Численное исследование

Принцип работы отражательного триода основан на эмиссии сильноточного электронного пучка в камеру в режиме ограничения тока пространственным зарядом. На анодную сетку подается постоянное ускоряющее напряжение U_0 . Электроны пучка при движении в диоде создают пространственный заряд, который приводит к объемному изменению потенциала и, как следствие, к торможению пучка в области за анодной сеткой. Эта область представляет собой виртуальный катод, который отражает электроны в направлении плоскости эмиссии. В коаксиальных системах (рис. 1, б, в) катод и анод расположены радиально на радиусах R_C и R_A соответственно, а ВК формируется на радиусе R_{vc} . В планарном триоде (рис. 1, а) катод, анод и ВК расположены аксиально и их координаты соответственно: Z_C , Z_A и Z_{vc} . Основными параметрами триодных систем являются межэлектродный (диодный) зазор d , радиальный размер пучка r_b в планарном триоде и аксиальная ширина катода h_c в коаксиальных триодах.

Исследования проводились для следующих значений параметров системы и пучка: планарного триода $Z_C = 2,5$ см, $r_b = 5$ см; коаксиального триода с радиально-сходящимся пучком $R_C = 10,5$ см, $h_c = 0,8...3,2$ см; коаксиального триода с радиально-расходящимся пучком $R_C = 5$ см, $h_c = 0,8...3,2$ см; $U_0 = 400...600$ кВ.

На рис. 2, а представлены конфигурационные портреты пучка для трех систем (рис. 1) в момент установления t_{ST} в них квазистационарного режима колебаний ВК; t_{ST} соответствует нескольким десяткам периодов колебаний. На рис. 2, б показаны распределения плотности заряда вдоль координаты движения пучка в системе на промежутке времени порядка одного периода $T = 1/f$ колебаний ВК (от 6 до 6,2 нс). По графикам распределения плотности заряда в камере можно выделить два экстремума (отмечены на рис. 2, б цифрами 1 и 2), координаты которых совпадают с положением реального и виртуального катодов. На рис. 2, б видно, как в области ВК и вблизи реального катода плотность заряда меняется периодически, причем амплитуда колебаний выше в области ВК в планарном и коаксиальном триоде со сходящимся пучком. В коаксиальном триоде с расходящимся пучком амплитуда колебаний и величина плотности заряда становятся сравнимыми, благодаря увеличению размеров ВК.

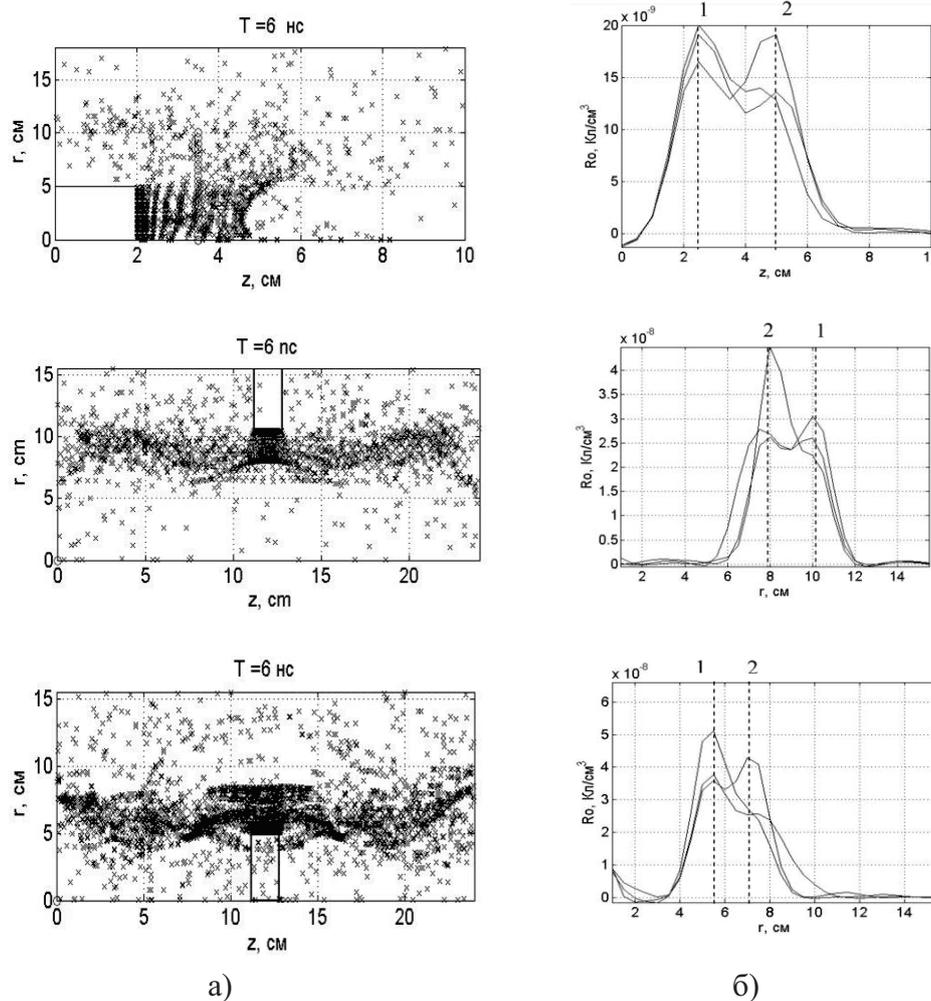


Рис. 2. Конфигурационные портреты пучка (а) и распределение плотности заряда вдоль координаты движения пучка в триодных системах (б); $U_0 = 450$ кВ

Численное исследование показало, что соотношение плотностей тока в максимумах (рис. 2, б) зависит от площади катода. Для пучков при $r_b/d > 2$ (планарный триод) и $h_c/d > 1,07$ (коаксиальные триоды) плотность заряда в области ВК в 1,5...1,2 раза выше плотности заряда в области реального катода. При этом спектр частот колебаний усредненной координаты виртуального катода имеет узкую полосу частот (рис. 3, б). С уменьшением отношения r_b/d (или h_c/d) уменьшается разница плотности заряда в максимумах (рис. 2, б), а также увеличивается ширина полосы частот колебаний ВК. Это обусловлено уменьшением фокусирующего действия собственного магнитного поля в диодном промежутке и уменьшением числа осциллирующих частиц пучка в промежутке катод-ВК.

Как показывают исследования, частота колебаний ВК имеет хорошее согласие с частотой плазменных колебаний в области виртуального катода

$$\omega_b^2 = \frac{4\pi e^2 n_b}{m},$$

где n_b – концентрация электронов в области виртуального катода; c – скорость света. Аналитическая оценка, рассчитанная по формуле, и численное значение дают хорошее совпадение. Исследования частотных характеристик колебаний виртуального катода в коаксиальных системах показывают, что частота колебаний в системе с радиально-сходящимся пучком выше частоты колебаний в системе с радиально-расходящимся пучком.

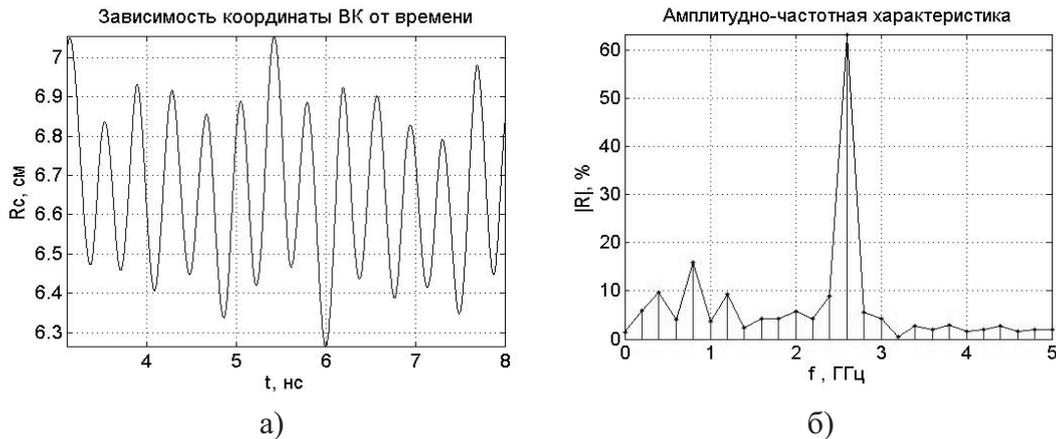


Рис. 3. Зависимость усредненной координаты виртуального катода от времени (а) и амплитудно-частотная характеристика колебаний ВК (б) коаксиального триода; $U_0 = 450$ кВ

Как отмечено выше, электроны пучка при движении в диоде создают пространственно распределенный заряд, который приводит к объемному изменению потенциала и, как следствие, к торможению пучка. В результате ток пучка I , который может проходить через диод, ограничен пространственным зарядом. Для одномерного нерелятивистского коаксиального диода I определяется выражением:

$$I = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{S \cdot U_0^{3/2}}{d^2 \cdot g^2(s)}, \quad g(s) = \frac{R_A}{d} (\ln(s) - \ln^2(s) + \dots), \quad (6)$$

где $s = R_A/R_C$ – параметр кривизны системы; S – площадь пучка на аноде. Формула (6) при $s \rightarrow 1$ переходит в закон $3/2$ для планарного диода.

На рис. 4 для планарного триода (рис. 1, а) при $d = 2$ см показаны зависимости плотности тока (тока анода деленного на площадь катода) от радиуса пучка на катоде для разных ускоряющих напряжений. При малых радиусах пучка плотность тока пучка на катоде выше, чем плотность тока одномерного диода, вычисленная по «закону $3/2$ ». О совпадении с «закон $3/2$ » можно говорить в узкой области напряжений и радиусов катода. При этом ограничение тока в диодном промежутке собственным магнитным полем пучка происходит при более высоких напряжениях (или радиусах пучка), чем показывает отношение $eU_0 / mc^2 > d / R$, полученное из сравнения ларморовского радиуса и диодного зазора.

Численно было проведено исследование характера изменения тока триода, амплитуды колебаний виртуального катода, частотных характеристик от ширины пучка для рассматриваемых систем. На рис. 5 представлены зависимости частоты колебаний ВК от ширины эмиссионной поверхности катода h_c в коаксиальных триодах (рис. 1, б, в). Как видно из рис. 5 частота колебаний ВК увеличивается с увеличением h_c и при $h_c / d \geq 1,1$ практически не зависит от ширины. При изменении ширины катода от 0,7 до 2,5 см ток триода в обоих коаксиальных триодах (со сходящимся и расходящимися пучками) меняется от 8 до 12 кА ($U_0 = 450$ кВ), повторяя зависимость частоты колебаний ВК от h_c (рис. 5, а, б). Т. е. ток в коаксиальном отражательном

триоде практически не зависит от ширины катода при $h_c/d > 1,1$, что связано с ограничением тока эмиссии собственным магнитным полем.

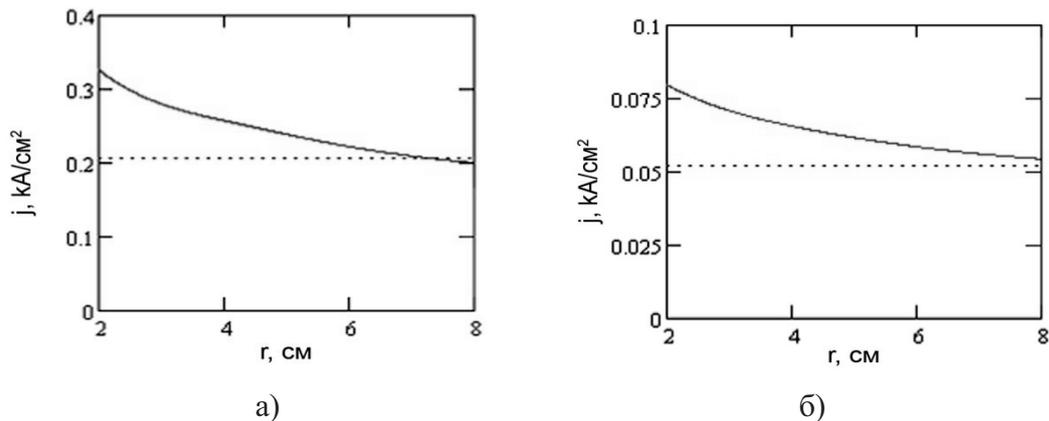


Рис. 4. Зависимость плотности тока от радиуса пучка в планарном (—) и одномерном (---) триодах: а) $U_0 = 200 \text{ кВ}$; б) $U_0 = 500 \text{ кВ}$

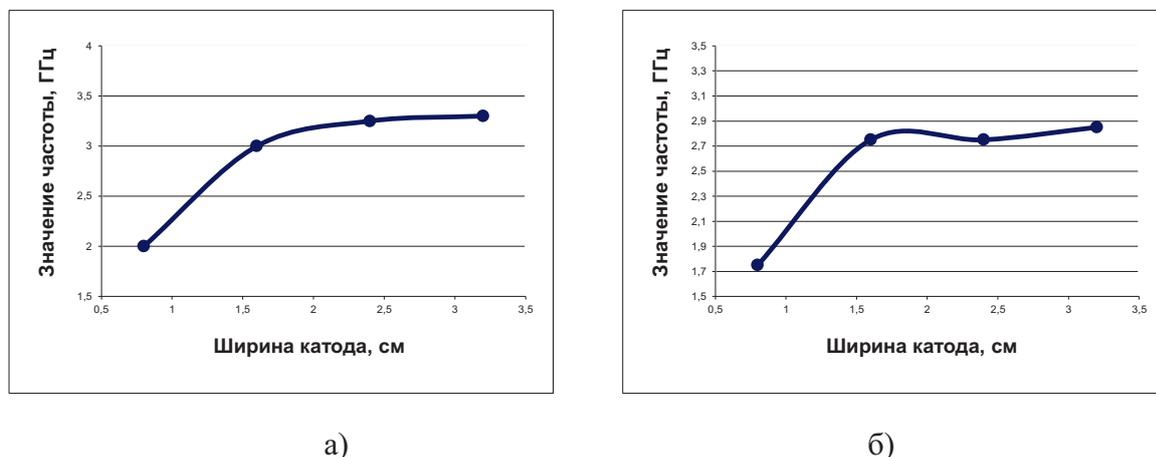


Рис. 5. Зависимость частоты колебаний ВК в коаксиальном триоде: а) сходящийся пучок; б) расходящийся пучок

Полученные результаты позволяют объяснить эксперименты [11], в которых в отражательном триоде со сходящимся пучком при изменении ширины пучка от 2 до 5,5 см при $d = 1,5 \text{ см}$ ток триода и частота электромагнитного излучения практически не изменялись, а мощность излучения возрастала более чем в 7 раз. С увеличением ширины эмиттера собственное магнитное поле пучка ограничивает ток пучка, но при этом более значительная часть электронов, отражаясь от ВК, возвращается в диодный промежуток, а не смещается вдоль сетки, как это происходит в узких пучках ($h_c/d < 1$). Поэтому увеличение мощности излучения в эксперименте связано с увеличением глубины модуляции электронов по фазе и увеличением числа электронов резонансно взаимодействующих с полем электродинамической структуры отражательного триода.

Заключение

В работе проведено моделирование динамики формирования виртуального катода в отражательных триодах с различной конфигурацией электродов: планарной и коаксиальной. Решение потенциальной задачи позволило изучить влияние геометрии системы на формирование ВК, а также на вольтамперные и частотные характеристики, исключая влияния на эти процессы электромагнитных высокочастотных полей.

Исследования показали, что в отражательном триоде устанавливается квазистационарный режим колебаний ВК, частота колебаний ВК зависит от плотности пространственного за-

ряда в области ВК. Краевые эффекты и собственное магнитное поле оказывают существенное влияние на формирование ВК, которые обуславливают отсутствие зависимости тока, частоты колебаний ВК и плотности заряда от размера катода и диодного промежутка при определенном соотношении ширины катода и диодного промежутка h_c/d (для коаксиального отражательного триода это выполняется при $h_c/d > 1,1$).

Из результатов проведенных исследований следует, что в отражательных триодах увеличение мощности электромагнитного излучения триодов можно получить при увеличении размера катода. А именно, когда за счет собственного магнитного поля уже не происходит изменения вольтамперных и частотных характеристик, а происходит увеличение глубины модуляции электронов по фазе и увеличение числа электронов резонансно взаимодействующих с полем электродинамической структуры отражательного триода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47. – № 6. – С. 645–668.
2. Дубинов А.Е., Лойко М.В. Численное моделирование приборов с виртуальным катодом с учетом рассеяния электронов на анодной фольге // Вычислительные технологии. – 2003. – Т. 8. – № 2. – С. 53–63.
3. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. Генерация электромагнитных колебаний в системах с виртуальными катодом. Плазменная электроника: сборник научных трудов / под ред. В.И. Курилко. – Киев: Наукова думка, 1989. – 120 с.
4. Григорьев В.П., Коваль Т.В. Теория генерации электромагнитных колебаний в системах виртуальным катодом // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1998. – № 4. – С. 169–182.
5. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Рахматуллин Р.Р. Самосогласованное стационарное состояние потока электронов в коаксиальных триодах // Известия ТПУ. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 123–129.
6. Антошкин М.Ю., Григорьев В.П., Коваль Т.В. Численная модель для исследования возбуждения аксиально-несимметричных волн в коаксиальных виркаторах // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40. – № 8. – С. 1300–1305.
7. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Козловских А.В. Движение электронов в отражательном триоде с учетом магнитного поля токоотводящей системы // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 139–143.
8. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
9. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. – М.: Мир, 1984. – 432 с.
10. Александров А.Ф., Кузелев М.В. Физика электронных пучков. – М.: МГУ, 2007. – 281 с.
11. Tuan N.M., Koval T.V., Melnikov G.V., Zherlitsyn A.G. The Research of the Coaxial Vircator with a Symmetric Converging Electron Beam // XVI International Symposium of High Current Electronics: Proceedings. – Tomsk, September 19–24, 2010. – Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. – С. 497–500.

Поступила 12. 03.2012 г.