

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Исследование динамики системы с интенсивными электронными
потоками в раках 2,5-мерной модели**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 225 группы

направления 03.04.03 Радиофизика

Факультета Нелинейных Процессов

Козубняк Алеси Сергеевны

Научный руководитель

Доцент, д.ф.-м.н.

С.А. Куркин

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

профессор, д.ф.-м.н.

чл.-корр. РАН

Д.И. Трубецков

Саратов 2018 г.

Введение

Сконца 70 х годов активно исследуются такие источники мощного СВЧ излучения как генераторы на виртуальном катоде (виркаторы) [1–5], характеризующиеся высоким уровнем мощности генерации СВЧ излучения, простотой конструкции, возможностью работы без магнитных полей, легкостью перестройки частоты и режима генерации. Принцип работы виркаторов основан на формировании в электронном потоке с током, превышающим предельный вакуумный (критический) ток [4–6], виртуального катода (ВК), отражающего часть электронов обратно к плоскости инжекции. Динамика виртуального катода в электронном потоке характеризуется сложными пространственно временными колебаниями, что часто приводит к генерации широкополосного СВЧ излучения в виркаторных системах [4, 7– 11]. В последнее время привлекают внимание исследователей и низковольтные системы с ВК, формирующимся в тормозящем поле (низковольтные виркаторы) [12–14]. В этих системах используется сложная динамика ВК в тормозящем поле для генерации широкополосного хаотического сигнала малого уровня мощности.

Традиционно одним из достоинств генераторов на ВК считается возможность работы без внешнего фокусирующего электроны магнитного поля. Вместе с тем, как показывают исследования, введение внешнего магнитного поля в системы с пучками с ВК может помочь в решении задачи управления режимами динамики ВК, а также повысить эффективность приборов, использующих колебания ВК. Поэтому большой практический и теоретический интерес представляет детальное исследование влияния внешнего магнитного поля на формирование и динамику виртуального катода в электронном потоке. Одной из первых работ, посвященных изучению влияния внешнего магнитного поля на характеристики генерации виркатора, была работа [15], в которой были получены экспериментальные зависимости мощности и частоты СВЧ излучения виркатора от величины

внешнего магнитного поля. Позднее аналогичные экспериментальные исследования проводились в работах [16–18], которые также показали сильное влияние внешнего магнитного поля на характеристики СВЧ излучения виртуального катода. Следует отметить работу [19], в которой было проведено планомерное изучение влияния внешнего однородного магнитного поля на мощность генерации виртода и показано, что с изменением магнитного поля наблюдаются осцилляции величины выходной мощности в такой системе.

Полученные экспериментальные данные были подтверждены результатами численного моделирования. В работе [20] посредством численного моделирования с использованием релятивистского электромагнитного кода “KARAT” рассматривалась динамика виртуального катода в трубчатом электронном потоке при малом магнитном поле. Было обнаружено, что в этом случае наблюдаются значительные пульсации проходящего пучка за плоскостью ВК, которые оказывают сильное влияние на характеристики СВЧ излучения в моделируемой системе. В работе [21] было проведено исследование влияния внешнего магнитного поля на КПД виркатора с использованием релятивистского электромагнитного кода “MAGIC” и обнаружено, что с увеличением магнитного поля КПД монотонно уменьшается и асимптотически стремится к постоянной величине. Аналогичные результаты были получены в работе [22], где был выявлен физический механизм подобного поведения КПД в зависимости от величины магнитного поля. В работах [23, 24] проводилось исследование влияния внешнего магнитного поля на критический (предельный вакуумный) ток сплошного слаборелятивистского электронного потока.

Отметим также виркатор редитронного типа (редитрон) [25, 26], в котором используется полый цилиндрический электронный поток в сочетании с щелевой конструкцией анода, осуществляющего селекцию отраженных

частиц. В этом виркаторе использование сильного магнитного поля является принципиальным для фокусировки пучка. Численные и экспериментальные исследования продемонстрировали высокий КПД и мощность генерации в подобной системе, а также, при определенных условиях, близкий к одночастотному спектр колебаний выходного поля [27].

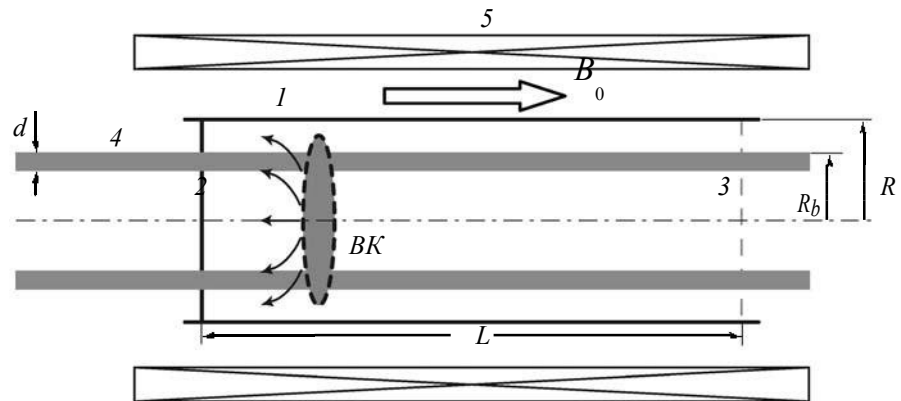


Рис. 1. Схема исследуемой модели: 1 – цилиндрическое пространство, 2 и 3 – входная и выходная сетки соответственно дрейфа, 4 – трубчатый электронный пучок, 5 – соленоид.

Таким образом, из анализа опубликованных работ становится очевидным, что динамика электронного потока со сверхкритическим током и характеристики генерации приборов с ВК зависят от величины внешнего магнитного поля. Процессы, происходящие в электронном потоке с ВК при изменении фокусирующего пучок внешнего магнитного поля, до сих пор остаются не до конца изученными и систематизированными. Их понимание позволит продвинуться в изучении систем с ВК, что является весьма важной и актуальной задачей как электроники больших мощностей, так и нерелятивистской СВЧ электроники при создании пучково-плазменных нерелятивистских генераторов хаотического сигнала с ВК (низковольтных виркаторов).

В представленной работе приведены результаты численного исследования влияния внешнего магнитного поля на условия и механизмы формирования и

динамику ВК в трубчатом слабoreлятивистском электронном потоке. В работе также рассматриваются особенности нелинейной динамики электронного потока с ВК при изменении внешнего магнитного поля, изучаются различные механизмы хаотизации колебаний ВК, приводящие к усложнению динамики виркаторной системы и к появлению многочастотного спектра колебаний ВК. Исследуется виркаторная система с неэкранированным от внешнего фокусирующего магнитного поля источником слабoreлятивистского электронного пучка.

1. ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

В качестве исследуемой системы была рассмотрена классическая модель для изучения динамики виртуального катода [6] (см. рис. 1). Система представляет собой пространство дрейфа I в виде отрезка цилиндрического волновода длиной L и радиусом R , закрытого с торцов сеточными электродами 2 и 3. Аксиальносимметричный моноскоростной на входе трубчатый электронный пучок 4 со скоростью v_0 и током I инжектируется в пространство взаимодействия через левую (входную) сетку и выводится через правую (выходную), а также может оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. Толщина пучка на входе в пространство взаимодействия $d = 0.1R$, а радиус $r = R_b$. В работе рассматривается трубчатый электронный пучок с геометрическим параметром $R_b/R = 0.5$ и начальной скоростью $\beta_0 = v_0/c = 0.5$. Выбор в качестве исследуемого потока пучка с трубчатой геометрией обуславливается тем, что пучки с такой геометрией наиболее часто используются в релятивистских генераторах, причем как в виркаторах (в первую очередь, в редитронах), так и в релятивистских сильноточных генераторах (например, черенковских генераторах) [3, 28]. Вдоль оси пространства дрейфа, в котором формируется ВК, прикладывается создаваемое соленоидом 5 внешнее однородное фокусирующее магнитное поле с индукцией $B_z = B_0$. В данной работе

рассматривается модель с неэкранированным от внешнего магнитного поля источником электронного потока, когда магнитное поле вдоль всей системы предполагается однородным. Подобное распределение магнитного поля является типичным для многих систем релятивистской СВЧ электроники.

В работе используется нестационарная двумерная модель динамики электронного потока в пространстве взаимодействия, которая основана на решении самосогласованной системы уравнений движения заряженных частиц, описывающих электронный пучок, и уравнения Пуассона для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда [29, 30].

В уравнениях, описывающих динамику электронного пучка, используются следующие безразмерные величины: потенциал φ и напряженность E поля пространственного заряда, индукция внешнего магнитного поля B , плотность ρ , скорость v и импульс электронов P , а также пространственные координаты z и r и время t , причем

$$\varphi' = \frac{v_0^2}{\eta_0} \varphi, E' = \frac{v_0^2}{L\eta_0} E, B' = \frac{v_0^2}{L\eta_0} B, \rho' = \rho_0 \rho, \quad (1)$$

$$v' = v_0 v, P' = m_e v_0 P, z' = Lz, r' = Lr, t' = \frac{L}{v_0} t$$

Здесь штрихом обозначены соответствующие размерные величины, $\eta_0 = e/m_e$ – удельный заряд покоящегося электрона, v_0 и ρ_0 – не зависящие от радиуса статические (невозмущенные) скорость и плотность электронного потока на входе в систему, L – длина пространства взаимодействия.

$$\frac{dP_{ri}}{dt} - \gamma(z_i, \theta_i, r_i) \left(\frac{d\theta_i}{dt} \right)^2 = -E_r - r_i B \frac{d\theta_i}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{dP_{\theta i}}{dt} + \gamma(z_i, \theta_i, r_i) \frac{dr_i}{dt} \frac{d\theta_i}{dt} = B \frac{dr_i}{dt}, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{zi}}{dt} = -E_z, \quad i = 1, \dots, N_0 \quad (4)$$

Здесь z_i , r_i и θ_i – продольная, радиальная и азимутальная координаты заряженных частиц соответственно, $P_{zi} = \gamma \dot{z}_i$, $P_{ri} = \gamma \dot{r}_i$ и $P_{\theta i} = \gamma r_i z \dot{\theta}_i$ – продольная, радиальная и азимутальная компоненты им импульсов заряженных

частиц соответственно, E_z и E_r – продольная и радиальная компоненты электрического поля, $B = B_z$ – продольная компонента внешнего магнитного поля в пространстве дрейфа (предполагается, что радиальная и азимутальная составляющие внешнего магнитного поля равны нулю $B_r = 0$ и $B_\theta = 0$), а $\beta_0 = v_0/c$, где v_0 – статическая (невозмущенная) скорость электронного потока на входе в систему, c – скорость света. Индексом i обозначены номера частиц, N_0 – полное число заряженных частиц, моделирующих электронный поток.

Уравнения движения (2)–(4) для каждой крупной частицы интегрировались численно методом с перешагиванием. Уравнение (3) может привести к неустойчивости азимутальной скорости частицы θ_i , так как из него следует, что $\theta_i \sim 1/r_i$, т.е. при малых r_i и больших временных шагах численного интегрирования Δt частица ведет себя “нефизично”, очень быстро приобретая момент импульса. Поэтому для корректного решения уравнений движения для частиц, близко подошедших к оси симметрии, интегрирование уравнений производилось в декартовой системе координат [30].

Распределение потенциала в пространстве взаимодействия находится самосогласованным образом с помощью уравнения Пуассона, которое в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} + \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = \alpha^2 \rho \quad (6)$$

где

$$\alpha = L \left(\frac{|\rho_0|}{v_0 \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где V_0 – ускоряющее напряжение пучка. Здесь α – это безразмерный управляющий параметр (критерий подобия задачи [5]), пропорциональный току пучка ($\alpha \sim I$) и длине пространства взаимодействия ($\alpha \sim L$). Уравнение Пуассона решается при следующих граничных условиях:

$$\varphi(z = 0, r), \varphi(z = 1, r) = 0, \varphi(z, r = R) = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=0} = 0, (9)$$

где условие (8) означает, что пучок инжектируется в пространство, ограниченное идеально проводящей поверхностью под нулевым потенциалом условие (9) на оси симметрии $r = 0$ определяется аксиальной симметрией пространства взаимодействия. Уравнение Пуассона (6) решалось методом сеток. Для нахождения плотности пространственного заряда использовалась снижающая сеточный шум процедура билинейного взвешивания крупных частиц (PIC метод) [30]. Следует заметить, что нахождение самосогласованного поля пространственного заряда с помощью уравнения Пуассона не позволяет учесть влияние собственного магнитного поля тока пучка и связанные с ним эффекты пинчевания потока [31]. Однако, как показывают оценки для слаборелятивистского электронного пучка (пучка с $\beta_0 \leq 0.5$), его собственное магнитное поле оказывается несущественным. Действительно, для характерных параметров исследуемого слаборелятивистского пучка ларморовская сила, определяемая собственным магнитным полем пучка, $F = \mu e r v^2 / 2\pi R^2 \sim 10^{-4}$ Н оказывается значительно меньше фокусирующей (дефокусирующей) силы $F_{r,2} = r B_0 \theta_i \sim 10^{-4}$ Н, определяемой внешним магнитным полем, скоростью и направлением орбитального движения частиц. Отсюда можно заключить, что вышеописанную математическую модель, не учитывающую собственные магнитные поля, справедливо использовать для исследования слаборелятивистских электронных потоков. Следует также отметить, что численное моделирование системы на основе решения уравнения Пуассона, а также выбор крупных частиц в виде заряженных колец, не позволяют учесть запаздывания поля при распространении электромагнитной волны в пространстве дрейфа, а также отследить азимутальную филаментацию пучка в области ВК. Анализ этих вопросов является весьма важным и будет проведен в рамках дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе в рамках численного моделирования с помощью двумерной математической модели показано, что виртуальный катод в трубчатом электронном потоке во внешнем фокусирующем магнитном поле демонстрирует различные режимы колебаний. Обнаружено, что в зависимости от величин внешнего магнитного поля и тока пучка, колебания ВК могут быть как регулярными, так и хаотическими. Показана сильная зависимость критического тока пучка α_{cr} , при котором в системе формируется ВК, от величины внешнего магнитного поля. Выявлено наличие оптимального магнитного поля, при котором критический ток минимален, и которое обусловлено конкуренцией между силами пространственного заряда, приводящих к “расплыванию” пучка в поперечном направлении, и фокусирующими силами внешнего магнитного поля.

Выявлен общий механизм хаотизации колебаний ВК в системе, связанный с образованием в электронном потоке электронных структур (ВК и вторичных по отношению к нему электронных уплотнений в пролетном потоке), взаимодействие между которыми через общее поле пространственного заряда определяет возникновение внутренней дополнительной обратной связи. Формирование вторичных электронных сгустков и взаимодействие их с ВК, которые определяют возникновение хаотических режимов колебаний ВК, наблюдается в системе либо при малых токах пучка ($\alpha \sim \alpha_{cr} - 1.5\alpha_{cr}$), либо при значительных токах ($\alpha > 3\alpha_{cr}$) и сильных внешних магнитных полях ($B > B_{min}$). Переход от хаотических режимов колебаний ВК к периодическим связан с разрушением механизма формирования вторичных электронных структур. Таким образом, исследования показали, что, изменяя величину внешнего магнитного поля, возможно эффективно управлять режимами генерации генератора на ВК.

Отметим, что переход к хаотическому режиму (образование вторичных сгустков) в случае значительных токов пучка ($\alpha > 3\alpha_{cr}$) и сильных внешних магнитных полей ($B > B_{min}$) обусловлен появлением в системе долгоживущих частиц, совершающих циклотронное вращение благодаря наличию большого по величине продольного магнитного поля в пространстве дрейфа. Усиление последнего эффекта возможно обеспечить введением экранировки источника электронного пучка от внешнего магнитного поля, так как это приведет к появлению у частиц потока начального момента импульса при его инжекции в пространство дрейфа с однородным магнитным полем. Можно предположить, что частичная или полная экранировка источника электронов от магнитного поля (например, размещение источника электронов в полях рассеяния соленоида), приведет к усложнению динамики колебаний виртуального катода в системе. Однако данный вопрос требует дальнейших исследований и анализа.

В заключение сделаем некоторые оценки размерных параметров. Рассмотрим типичную виркаторную систему, имеющую пространство дрейфа длиной $L = 5$ см, радиусом $R = 1.25$ см, в котором распространяется трубчатый электронный пучок с радиусом $R_b = 0.625$ см. Пусть безразмерная скорость электронного потока $\beta_0 = 0.5$, что соответствует ускоряющему напряжению электронного потока $V_0 = 64$ кВ. В табл. 1 и 2 приведены значения размерных управляющих параметров системы для различных режимов динамики ВК. Таблица 1 соответствует постоянной величине внешнего магнитного поля при различных токах пучка, а табл. 2 – постоянному току пучка при различных величинах внешнего магнитного поля. Из таблиц следует, что режим динамики ВК определяется величинами внешнего магнитного поля и тока пучка в соответствии с безразмерной картой режимов (см. рис. 2).

Таблица 1. Значения тока пучка, соответствующие различным режимам динамики ВК, при фиксированной величине внешнего магнитного поля $B = 6$ кГс

Безразмерный ток α	Размерный ток I , кА	Режим динамики ВК
23	1.6	Хаотический
30	2.7	Периодический
40	4.8	Хаотический
45	6	Хаотический

Таблица 2. Значения величины внешнего магнитного поля, соответствующие различным режимам динамики ВК, при фиксированной величине тока пучка $I = 4.8$ кА

Безразмерное магнитное поле B	Размерное магнитное поле B , кГс	Режим динамики ВК
5	0.85	Периодический
10	1.7	Периодический
20	3.4	Периодический
30	5.1	Хаотический
35	6	Хаотический

Отметим, что величина критического тока трубчатого электронного пучка при больших внешних магнитных полях $B > 5$ кГс приблизительно равна 0.3 кА. Это значение находится в хорошем соответствии со значением, получаемым с использованием аналитического выражения для критического (предельного вакуумного) тока пучка в случае полностью замагниченного потока[5, 6]

$$I_0 = 17.03 \frac{\left(\gamma^{2/3} - 1\right)^{3/2}}{d/R_b + 2 \ln(R/R_b)}, \quad [\text{kA}]. \quad (16)$$

Исследования зависимости критического тока, при котором в трубчатом потоке возникает не стационарный ВК, позволяют также определить условия подавления возбуждения паразитных режимов, связанных с развитием пирсовской неустойчивости и возникновением нестационарного ВК в традиционных сильноточных генераторах, путем изменения внешнего магнитного поля. В заключение следует отметить, что полученные результаты показывают сильное влияние внешнего магнитного поля на

динамику и характер колебаний ВК. Это необходимо учитывать при создании систем на ВК с фокусировкой пучка магнитным полем, когда при одном и том же токе пучка мы можем наблюдать различные режимы генерации при изменении величины внешнего фокусирующего магнитного поля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Ф., Фоменко Г.П. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 4. С. 321.
2. Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Сулакшин А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 24. С. 48.
3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1, 2. М.: Физматлит, 2003, 2004.
4. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
5. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. ХLI. С. 1137.
6. Короновский А.А., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 722.
7. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю. и др. // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. Вып. 2. С. 462.
8. Hnatov A.E., Rempen I.S. // Int. J. Electronics. 2004. V. 91. № 1. P. 1.
9. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 1009.
10. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 51. Вып. 11. С. 51.
11. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. Т. 77. Вып. 10. С. 139.
12. Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстеттер С.И. и др. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. С. 530.
13. Kostov K.G., Yovchev I.G., Nikolov N.A. // Electronics Letters. 1999. V. 35. № 19. P. 1647.
14. Jiang W., Kitano H., Huang L. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24. P. 187.
15. Егоров Е.Н., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. Вып. 8. С. 742.
16. Морозов М.Ю., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. Вып. 7. С. 610.

17. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Morozov M.Yu., Mush? takov A.V.* // Phys. Lett. A. 2008. V. 372. P. 876.
18. *Kwan T.J.T., Davis H.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. V. 16. № 2. P. 185.
19. *Davis H.A., Bartsch R.R., Kwan T.J.T. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. V. 16. № 2. P. 192.
20. *Davis H.A., Fulton R.D., Sherwood E.G., Kwan T.J.T.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. V. 18. № 3. P. 611.
21. *Tsimring S.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2007.
22. *Рошаль А.С.* Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.