

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В СЖАТОМ СОСТОЯНИИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Е.Н. ЕГОРОВ¹, А.А. КУРАЕВ², С.В. КОЛОСОВ²,
А.А. КОРОНОВСКИЙ^{1,3}, А.Е. ХРАМОВ^{1,3}

¹*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия
evgeniy.n.egorov@gmail.com*

²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
rak@bsuir.by, kurayev@bsuir.by*

³*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия
hramovae@gmail.com*

Приведены результаты численного исследования взаимодействия трубчатого электронного потока с электромагнитным полем в низковольтной виркаторной системе. Показана возможность формирования сжатого состояния в нерелятивистском потоке. Обсуждается влияние управляющих параметров системы на динамику потока в сжатом состоянии.

Ключевые слова: виртуальный катод, трубчатый пучок, сжатое состояние.

Устройства СВЧ электроники, демонстрирующие сложную хаотическую динамику, известны с 70х годов и могут использоваться в современных информационно-телекоммуникационных системах, основанных на использовании широкополосных хаотических сигналов для передачи и хранения информации [1], а также для целей СВЧ-нагрева плазмы, радиолокации, радиопротиводействия, электромагнитной совместимости и т.д.. К числу перспективных приборов в этом отношении относятся приборы со сверхкритическим током – так называемые генераторы на виртуальном катоде – виркаторы, виртоды, отражательные триоды и т.п. [2], в том числе и их низковольтные модификации [3].

Исследование процессов взаимодействия электронного пучка с виртуальным катодом и электромагнитного поля проводилось на примере виркатора с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП). Удобство использования МИП в виркаторах связано с высоким первенсом электронного пучка МИП [3], а также в МИП принципиально использование ведущего магнитного поля. Кроме того, трубчатый винтовой электронный поток, формируемый в МИП, обладает собственным высоким уровнем шума, а также принципиальным значительным разбросом электронного потока по скоростям и энергиям [4].

В работе рассматривалась схема в которой анод пушки соединён с пространством дрейфа виркатора в единое цилиндрическое пространство дрейфа. При этом камера дрейфа разделяется на две части, и на правую часть камеры подаётся тормозящий потенциал, меньший потенциала анода $V_r < V_a$. Численное исследование процессов в МИП проводилось с помощью 2.5D-мерной математической модели, основанной на самосогласованной системе уравнений движения и уравнения Пуассона (квазистатистический подход) для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда. Мо-

делирование динамики электронного потока проводилось методом крупных частиц (PIC-метод). Магнитное поле в МИП имеет конфигурацию магнитной ловушки (в области катода продольная величина B_z магнитного поля меньше, чем в области трубы дрейфа). Моделирование системы проводилось в безразмерном виде, что позволяло обобщить полученные результаты, как на нерелятивистский случай, так и на случай слабого релятивизма.

В области отражающего электрода при превышении тормозящей разности потенциалов некоторого критического значения в трубе дрейфа образуется виртуальный катод (ВК). Как показали исследования, образование ВК в трубчатом винтовом пучке происходит под действием двух факторов, а именно магнитного поля, вследствие происходящей в магнитной ловушке перекачки энергии продольного движения в энергию поперечного, а также под действием собственных полей пространственного заряда пучка. При этом влияние пространственного заряда приводит к значительному усложнению динамики винтового электронного потока с виртуальным катодом, формируемого МИП. В данном случае наличие самосогласованного влияния пространственного заряда может приводить к разнообразной, сложной, вплоть до хаотической, нелинейной динамике электронного потока.

Интересным является случай, когда область магнитной ловушки и область, где вводится дополнительное торможение пучка, разделены пространственно, т.е. тормозящий электрод находится в области постоянной величины (полочки) магнитного поля пространства дрейфа. В этом случае в системе в области между магнитной ловушкой и тормозящим электродом устанавливается так называемое сжатое состояние пучка (ССП). Необходимо пояснить, что СПП характеризуется высокой плотностью и малой скоростью электронов потока в некоторой области пространства взаимодействия и наблюдается обычно в релятивистских системах с ВК. Однако формирования СПП можно добиться, как показали данные исследования, и в низковольтной виркаторной системе. Была построена карта режимов на плоскости управляющих параметров (ток, торможение). Показано, что при увеличении безразмерного тока пучка или тормозящей разности потенциалов в системе наблюдается режим нестационарного виртуального катода, а затем и режим СПП.

Также было показано, что для системы с дополнительным торможением пучка характерно возникновение продольных колебаний пространственного заряда в сжатом состоянии потока. Показано, что в пучке четко прослеживаются колебания пространственного заряда в области около катода, а также в области СПП. Колебания плотности пучка сопровождаются колебаниями потенциала пространства. Возникновение этих колебаний определяется колебаниями плотности в области магнитной ловушки, которые движутся вдоль пространства со скоростью волн пространственного заряда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №№ 14-02-31149 мол_а, 12-02-00345, 12-02-33071, 13-02-90406) и Президентской программой поддержки молодых российских ученых (проекты МД-345.2013.2 и МК-818.2013.2).

Список литературы

1. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
3. *Калинин Ю.А.* и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 1009.
4. *Tsimring S.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.