

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СГУСТКОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТУРБУЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

Ю.А. КАЛИНИН, А.В. СТАРОДУБОВ, Н.Н. КУЗНЕЦОВ

*ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 441012, Россия
StarodubovAV@gmail.com*

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование структуры, энергетических и спектральных характеристик сгустков пространственного заряда в турбулентных электронных пучках. Установлено, что наличие разброса электронов по скоростям в пространстве дрейфа является причиной формирования внутренней распределенной электронной обратной связи, что в свою очередь собой необходимое условие для существования генерации. Воздействие неоднородного магнитного поля, тормозящего электрического поля на многоскоростные электронные пучки приводит к усилению неламинарности (турбулентности) в многоскоростных электронных пучках.

Ключевые слова: вакуумная СВЧ электроника, электронный пучок, турбулентность, разброс электронов по скоростям, физический эксперимент.

В приборах сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники в основном используются ламинарные (или близкие к ним) интенсивные электронные пучки [1].

Однако в последнее время в связи с разработкой и созданием СВЧ генераторов широкополосных шумоподобных колебаний (включая хаотические[2]) определенный интерес представляют неламинарные (турбулентные) электронные пучки и исследование их структуры и свойств [3]. Такие пучки являются, как правило, многоскоростными и позволяют формировать сгустки пространственного заряда в различных поперечных плоскостях. Сгустки пространственного заряда, плотность тока в которых в несколько сотен раз превышает величину плотности тока на входе в пространство взаимодействия, сильно неустойчивы и совершают интенсивные пространственно-временные колебания. Данные пространственно-временные колебания являются источниками широкополосного шумоподобного СВЧ излучения малой и средней мощности [4]. В данной работе рассмотрены результаты теоретических, на основе проведения численного моделирования физических процессов на ЭВМ, и экспериментальных исследований спектральных и энергетических характеристик сгустков пространственного заряда в интенсивных неламинарных (турбулентных) электронных пучках.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что изменением параметров неоднородного магнитного поля и величины тормозящего потенциала на коллекторе можно управлять как величиной плотности тока в формирующихся сгустках пространственного заряда, так и их шириной. Необходимым условием формирования сгустков пространственного заряда является наличие разброса электронов по продольным скоростям, который достигается в катодно-сеточной области при определенных значениях амплитуды и видах неоднородности распределения магнитного поля.

Экспериментальные исследования проводились методами физического эксперимента с использованием разборной вакуумной установки [5]. Питание лабораторного макета осуществлялось в импульсном режиме при ускоряющем напряжении $U_0 = 700 \text{ В}$ и токе пучка $I = 150 \text{ мА}$. Катодно-сеточный узел состоял из термокатода и двух сеток. Первая сетка являлась управляющей, и на нее подавалось ускоряющее напряжение U_0 .

Вторая сетка находилась под потенциалом $U_1 < U_0$, что обеспечило торможение электронного пучка. Ячейки второй сетки расположены таким образом, что перекрывают только периферийную часть электронного пучка. Таким образом, вторая сетка оказывает тормозящее воздействие только на периферийные электроны в пучке, в то время как приосевые электроны практически не изменяют своей скорости. Последнее способствует активному росту разброса электронов по скоростям и ведет к формированию многоскоростного электронного пучка.

Используя метод тормозящего поля и соответствующие исследовательские зондовые устройства [5], была исследована функция распределения электронов по продольным скоростям. Проведено экспериментальное исследование огибающей многоскоростного электронного пучка. С помощью подвижного вывода энергии представляющего собой несколько витков спирали, соединенных с коаксиальным выводом энергии, были измерены интегральные значения мощности шумоподобных колебаний при перемещении устройства вдоль пространства взаимодействия. Установлено, что изменение интегральной мощности хорошо коррелируется с огибающей контура электронного пучка, а также с местом образования сгустков пространственного заряда.

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что для создания электронного пучка с выраженной многоскоростной структурой необходимо обеспечить формирование начального разброса электронов по скоростям в области электронной пушки, в частности, с использованием сеточных структур. Наличие разброса электронов по скоростям в пространстве дрейфа является причиной формирования внутренней распределенной электронной обратной связи, что в свою очередь собой необходимо условие для существования генерации. Воздействие неоднородного магнитного поля, тормозящего электрического поля на многоскоростные электронные пучки приводит к усилению неламинарности (турбулентности) в многоскоростных электронных пучках. В турбулентных электронных пучках с выраженной многоскоростной структурой происходит интенсивное формирование плотных сгустков пространственного заряда, пространственно-временные колебания которых являются источниками широкополосных шумоподобных колебаний.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-02-01209, № 14-02-00329, № 14-02-90006, а также Президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-828.2014.2) и молодых ученых – кандидатов наук (проект МК-1373.2014.2).

Список литературы

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электроники для физиков. Т. 1,2. М.: Физматлит, 2003, 2004.
2. Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
3. Kalinin Ju.A., Starodubov A.V. // Physics of wave phenomena. 2011.19, No. 1 (19), P. 18–23.
4. Kalinin Ju.A., Starodubov A.V., Fokin A.S. // Physics of wave phenomena. 2012. No 3 (20), pp. 193-198.
5. Ю.А. Калинин, А.Д. Есин. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ-электронике. Саратов: Изд-во СГУ, 1991.