

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 системы с виртуальным катодом и источником электронов в  
виде магнетронно-инжекторной пушки**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 421 группы  
направления 03.03.03 Радиофизика  
Факультета Нелинейных Процессов  
Кузнецова Владислава Олеговича

Научный руководитель

к.ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_

Е.Н. Егоров

Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн

чл.-корр. РАН,

профессор

\_\_\_\_\_

Д.И. Трубецков

Саратов 2018 г.

## Введение

В центре внимания электроники сверхвысоких частот как науки находится изучение процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с переменными электромагнитными полями [1]. При этом электроника СВЧ исследует преимущественно такие системы, в которых время пролёта электронов через пространство взаимодействия является сравнимым с длительностью периода возбуждаемых электронным потоком колебаний или даже немного превосходит его. Электронно-волновые системы, содержащие электронные потоки с виртуальным катодом (ВК), являются перспективными компонентами элементной базы устройств, предназначенных для широкополосной передачи данных, систем радиолокации и радиопротиводействия на основе широкополосных хаотических сигналов СВЧ - диапазона, систем медицинского и технологического назначения.

Важной фундаментальной проблемой современной радиофизики и электроники СВЧ является изучение колебательных и волновых процессов в интенсивных потоках заряженных частиц, возникающих под влиянием собственных полей пространственного заряда и приводящих к образованию минимума потенциала (ВК) в пространстве дрейфа электронного потока. Это связано как с изучением общих свойств активных электронно-волновых сред со сложной динамикой, так и с прикладными задачами создания генераторов широкополосного хаотического сигнала СВЧ на виртуальном катоде [2].

Целью работы было ознакомиться с принципами работы магнетронно-инжекторной пушки, также необходимо было составить алгоритм для численного моделирования магнетронно-инжекторной пушки, формирующей винтовой электронный пучок с учётом особенностей электронной оптики. Кроме того, необходимо было исследовать динамику виртуального катода в пучке с винтовым электронным потоком в зависимости от величины и конфигурации магнитного поля, величины тока, а также тормозящей разности потенциалов.

## Основное содержание работы

Работа состоит из трёх глав. В первой главе у нас идёт ознакомление с принципами работы систем электронно-волновой природы, интегрирование уравнений движения, метод с перешагиванием, интегрирование уравнений поля. Во второй главе рассказывается о магнетронно-инжекторной пушке, математическая модель, численная схема моделирования. В третьей главе идёт обсуждение численных исследований.

**Первая глава.** В любом электронном приборе взаимодействие переменного электромагнитного поля (электромагнитных колебаний или волн) с электронами (свободными или связанными) является основным в его работе. Поле воздействует на электронный поток, создаёт в нём переменный ток, который, в свою очередь, изменяет поле. В физике такие системы называют самосогласованными. Разумеется, можно, да и нужно, детализировать устройство электронного прибора. Но всегда имеется связка поле – электроны (в более общем виде – поле – активная среда) [1, 3].

### Интегрирование уравнений движения, метод с перешагиванием.

Один из наиболее часто используемых методов интегрирования называется методом с перешагиванием. Два дифференциальных уравнения первого порядка, интегрируемые по отдельности для каждой частицы, имеют вид:

$$m \frac{dv}{dt} = F \quad (1.1)$$

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad (1.2)$$

где  $F$  - сила. Эти уравнения заменяются конечно-разностными уравнениями

$$m(v_{new} - v_{old}) / \Delta t = F_{old} \quad (1.3)$$

$$(x_{new} - x_{old}) / \Delta t = v_{new} \quad (1.4)$$

### Интегрирование уравнений поля

Зная плотности заряда и тока, заданные в узлах сетки можно определить электрические и магнитные поля в общем виде, из уравнений Максвелла, где  $\rho$  и  $J$  используются как источники. Предполагая выполнение условия  $\nabla \times E = -\partial B / \partial t \approx 0$ , так что  $E = -\nabla \varphi$ , мы изложим метод расчёта поля  $E$  в одномерном электростатическом случае. Независимую пространственную переменную обозначим через  $x$ . Основные дифференциальные соотношения для поля имеют вид:

$$E = -\nabla \varphi \text{ или } E_x = -\partial \varphi / \partial x \quad (1.5)$$

$$\nabla E = \rho / \varepsilon_0 \text{ или } \partial E_x / \partial x = \rho / \varepsilon_0 \quad (1.6)$$

с учётом соотношений (1.5) и (1.6) получаем уравнение Пуассона

$$\nabla^2 \varphi = -\rho / \varepsilon_0 \text{ или } \partial^2 \varphi / \partial x^2 = -\rho / \varepsilon_0 \quad (1.7)$$

**Во второй главе** рассказывается о магнетронно-инжекторной пушке математическая модель, численная схема моделирования.

Для того чтобы учесть максимальное число факторов, влияющих на динамику ВЭП (винтовой электронный поток), проводилось моделирование динамики ВЭП с учётом условий инжекции пучка с катода в геометрии магнетронно-инжекторной пушки (МИП).

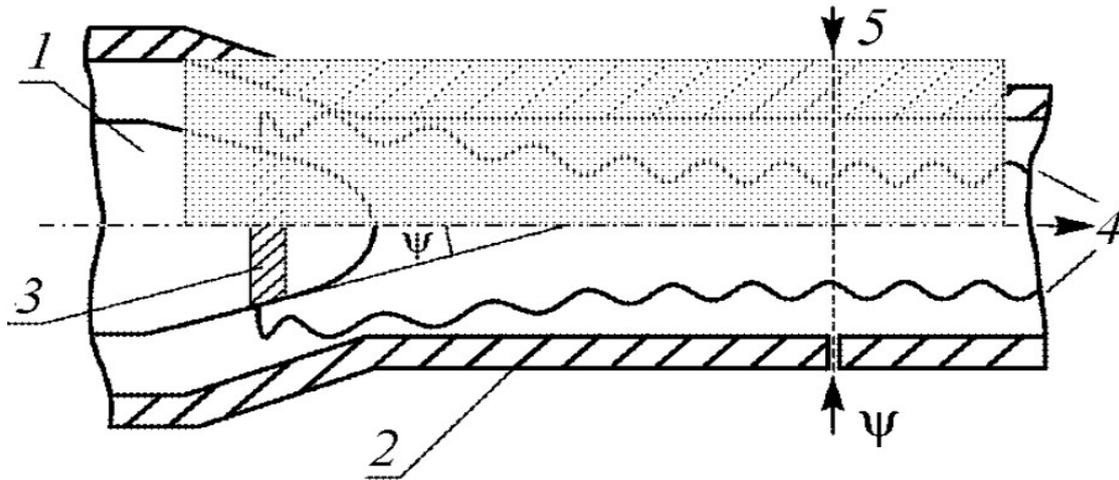


Рисунок 3. Схема магнетронно-инжекторной пушки. 1- катод пушки, 2-ускоряющий электрод, 3 – эмиттирующий пояс, 4- электронный поток. Серым выделена область численного моделирования процессов в МИП [4].

Магнитное поле в системе задаётся в аналитическом виде исходя из условия параксиальности, то есть  $B_z(r, z) \approx B_z(0, z) = B_z$ . При этом продольная  $B_z$  и поперечная  $B_r$  составляющие магнитного поля задаются следующими выражениями :

$$B_z(z) = \left[ \frac{1}{2} \tanh \left( \frac{8(z - 0.5(z_0 + z_k))}{z_0 - z_k} \right) + \frac{1}{2} \right] (B_0 - B_k) + B_k \quad (1.8)$$

$$B_r(r, z) = -2r \frac{B_0 - B_k}{z_0 - z_k} \left[ 1 - \tanh \left( \frac{8(z - 0.5(z_0 + z_k))}{z_0 - z_k} \right) \right]$$

Компоненты магнитного поля (1.8) выбраны исходя из условий  $\text{div}B = 0$ . Основным параметром в данном случае выступает  $\sigma = B_0 / B_k$ , который определяет перепад величины магнитного поля от области инжекции пучка (катода) до пространства дрейфа системы. Значение  $\sigma > 1$  соответствует случаю формирования в системе магнитной ловушки для электронов винтового пучка. Изменяя  $z_0$  и  $z_k$ , мы меняем форму магнитной ловушки. Все физические величины в предложенной модели приведены в нормированных единицах.

Уравнения движения численно интегрируются с помощью стандартного метода Рунге-Кутты 4 – го порядка.

Таким образом, численное решение задачи включает в себя численное интегрирование уравнений движения, взвешивания зарядов крупных частиц на сетке и решения конечно-разностного аналога уравнения Пуассона с учетом граничных условий и распределения плотности пространственного заряда электронов двух пучков.

**В третьей главе** обсуждаются результаты расчётов. Данные получались для нескольких величин тормозящего поля. Менялся при этом ток пучка. Далее условно выбиралось три точки ( $U_1, U_2, U_3$ ) на пути дрейфа электронов и строились спектры колебаний поля в пространстве взаимодействия для каждого из выбранных случаев. Особенно интересны были те случаи, в которых возникали высокоамплитудные колебания на одной из гармоник. Подобные исходы обычно имели периодический характер и свидетельствовали о том, что при накоплении заряда в пучке появлялась своя собственная коллективная динамика электронов. Чем торможение выше, тем сильнее и проявлялись эти ситуации.

## Заключение

1. Ознакомился с принципами работы магнетронно-инжекторной пушки.
2. Составил алгоритм для численного моделирования магнетронно-инжекторной пушки, формирующей винтовой электронный пучок с учётом особенностей электронной оптики.
3. С помощью программы была исследована динамика виртуального катода в пучке с винтовым электронным потоком, в ходе работы менялись такие параметры, как величина магнитного поля  $B_0$  от 0.04 до 0.16 включительно, изменялось торможение поля  $V_{a2}=0.5$ ,  $V_{a2}=0.7$ , менялся безразмерный ток пучка  $\alpha=1.3, 1.6, 1.9$ . Все физические величины безразмерны. Построены спектры мощности колебаний. Построены зависимости плотности пространственного заряда пучка ( $\rho(z,t)$ ) в пространстве и времени для пучка с отражательным ВК, построены графики зависимости частоты  $f$  от параметра магнитного поля  $B_0$  по спектрам мощности колебаний.

Автор выражает глубокую благодарность Евгению Николаевичу Егорову за оказанную помощь в написании этой работы, обсуждения и полезные наставления.

## Список литературы

- [1] Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Том I. М.: Физматлит, 2003.
- [2] Е.Н. Егоров, А.Е. Храмов. Нелинейная динамика винтового электронного потока в режиме формирования виртуального катода. Изв. Вузов «ПНД», т. 19, №4, 2011.
- [3] М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн. М.–Ижевск: РХД, 2000
- [4] Е.Н. Егоров. Нелинейные колебательные явления в системах, содержащих нерелятивистские электронные пучки с виртуальным катодом в тормозящем поле. Саратов 2007. С. 72-77.
- [5] Ч.Бэдсел, А.Ленгдон. Физика плазмы и численное моделирование. Москва: Энергоатомиздат, 1989.
- [6] A.M. Ignatov, V.P. Tarakanov. Phys. Plasmas. 1994. V. 1, N 3. P. 741.