

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Исследование динамики электронного потока со  
сверхкритическим током**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 421 группы  
направления 03.03.03 радиофизика  
студентки 4 курса Факультета нелинейных процессов  
Макаровой Натальи Александровны

Научный руководитель  
доцент,  
к.ф.-м.н.

Ремпен И.С

Заведующий кафедрой электроники,  
колебаний и волн,  
член-корреспондент РАН,  
д. ф.-м.н., профессор

Трубецков Д.И.

Саратов 2019 год

## **Введение.**

Большой практический и теоретический интерес представляет исследование влияния внешнего магнитного поля на формирование и динамику виртуального катода (ВК) в электронном потоке. Приборы с виртуальным катодом выделяются на фоне других по мощности генерации. Все мощные приборы представляют собой, как правило, вакуумные устройства, в которых рабочим телом является поток заряженных частиц (электронов), в связи с чем система формирования электронного потока является их неотъемлемой и важной частью. Физические процессы в системах формирования сильно сказываются на дальнейшем поведении потока в пространстве взаимодействия и могут быть причиной еще не понятых до конца эффектов в СВЧ приборах. Поэтому появляется необходимость изучать динамику частиц, начиная с области формирования. Известно, что, если ток электронного пучка, инжектируемого в дрейфовую камеру, достаточно велик, в системе образуется виртуальный катод (ВК), от которого электроны отражаются в сторону инжектора. Приборы, функционирование которых основано на наличии виртуального катода были названы виркаторами. В виркаторах эмитированные с катода электроны ускоряются в пространстве между катодом и сеткой, пронизывают её; затем часть электронов испытывает отражение под действием поля собственного объёмного заряда и полей, создаваемых электродами. Поверхность внутри электронного пучка, на которой электростатический потенциал имеет потенциал катода и где (в отсутствие высокочастотного поля) скорость электронов обращается в нуль, получила название виртуального катода. В процессе генерации происходит модуляция коллекторного и отражённого токов, инерционная группировка электронов и осцилляции места разворота частиц. Экспериментальное доказательство генерации СВЧ-излучения за счет колебаний виртуального катода и дальнейший «взрывной» интерес к виркаторам обусловлен, в первую очередь, значительными успехами в развитии сильноточной электроники (высоковольтной техники, техники создания и транспортировки

интенсивных электронных пучков). Низкий импеданс устройства, обеспечивает высокую мощность при низком напряжении или оптимизирует связь с низкоомными источниками питания, такими как взрывные генераторы, которые отличаются своей компактностью и высокоэнергетичностью. Виркаторы используются как генераторы излучения в СВЧ и рентгеновском диапазонах. Мощность таких генераторов может достигать уровня  $10^{10}$ — $10^{12}$  Вт. Один виркатор способен генерировать излучение в одну или две октавы. На Рис. 1 представлены прогнозируемые диапазоны частот и мощностей, которые смогут достичь различные классы приборов мощной СВЧ-электроники.

Одной из первых работ, посвященных изучению влияния внешнего магнитного поля на характеристики генерации виркатора, была работа, в которой были получены экспериментальные зависимости мощности и частоты СВЧ-излучения виркатора от величины внешнего магнитного поля. Позднее аналогичные экспериментальные исследования проводились в работах, которые также показали сильное влияние внешнего магнитного поля на характеристики СВЧ-излучения виртуального катода.

В связи со всем, что было сказано ранее, что изучение виртуального катода было и остается очень актуальной темой, представляющей большой интерес для электровакуумной электроники.

Объектом исследования дипломной работы стали электронные пучки в пространстве дрейфа. Для изучения явления образования ВК использовали программу, моделирующую нестационарную двумерную модель динамики электронного потока в пространстве взаимодействия, основанную на решении самосогласованной системы уравнений движения заряженных частиц. Исследование взаимодействия этих эффектов в электронном пучке имеет большой интерес, как в чисто теоретическом рассмотрении – выявлении новых режимов динамики электронного пучка, так и практическому применению полученных результатов – построению

приборов на их основе приборов, использующихся в областях физики больших мощностей СВЧ- и ТГц- электроники.

Цель выпускной работы – изучение динамики электронного потока в магнитных полях, а также исследование формирования ВК в пространстве дрейфа с помощью компьютерного моделирования для выявления ранее не изученных режимов работы. Программа AutoVers\_Sp\_Rab для анализа поведения виртуального катода, создана сотрудниками кафедры электроники, колебаний и волн. По полученным данным строились различные характеристики и зависимости, с помощью вспомогательных программных средств, таких как, например, Gnuplot. Наличие виртуального катода в полученном электронном потоке определяется по появлению отрицательных скоростей частиц в общем массиве данных

В рамках указанной цели решались следующие задачи:

1. Исследование принципа формирования ВК в двухмерной модели. А именно изучение теории образования виртуального катода и условия его формирования в исследуемой модели. Исследование поведения модели ВК при значении большой величине внешнего магнитного поля и определение границ применения модели. Исследование зависимости тока инжекции от безразмерного радиуса электронного потока при разных энергиях инжектируемых электронов. Построение зависимостей первого и второго критических тока инжекции при разных значениях магнитного поля. Исследование поведения отношения критических токов.
  - 1.1 Исследование динамики формирования ВК и поведения электронных пучков в пространстве дрейфа под действием внешнего магнитного поля, а так же измерение средней ширины ВК при различных параметрах системы. Определение и исследование положения ВК в пространстве дрейфа в зависимости от параметров системы.

Структура выпускной квалификационной работы:

Введение

Глава 1. Исследование процессов образования виртуального катода.

1.1. Теория образования виртуального катода (ВК).

1.2. Исследуемая модель

1.3 Формирование виртуального катода

1.4 Исследование зависимости плотности тока инжекции от безразмерного радиуса электронного потока.

1.5 Исследование зависимости тока инжекции от безразмерного радиуса электронного потока при разной энергии инжектируемых электронов.

1.6 Исследование зависимости плотности тока инжекции от значения магнитного поля, при котором возникает ВК.

1.7 Поведение модели ВК при значении магнитного поля  $B > 30$ .

1.8 Выводы

Глава 2. Исследование параметров виртуального катода.

2.1 Определение и исследование положения минимума потенциала виртуального катода в пространстве дрейфа.

2.2 Исследование средней ширины виртуального катода за период.

2.3. Выводы.

Заключение.

Список литературы.

Благодарности.

### **Основное содержание работы.**

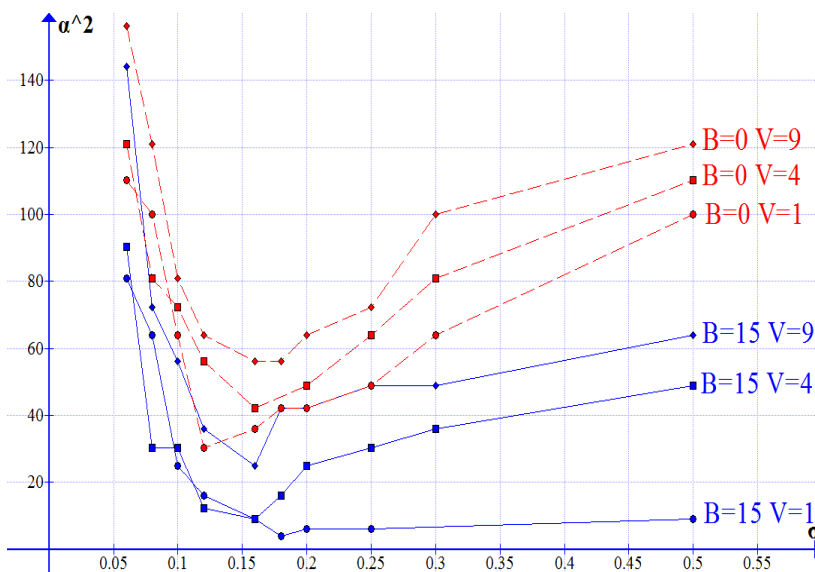
В первой главе были исследованы принципы формирования виртуального катода в двумерном приближении с помощью программы AutoVers. Рассмотрены основные физические законы, влияющие на формирование виртуального катода, был сделан вывод, что в данном приближении при скоростях электронов меньше скорости света можно

пренебречь внутренними магнитными силами стягивания пучка. А также описан алгоритм программы.

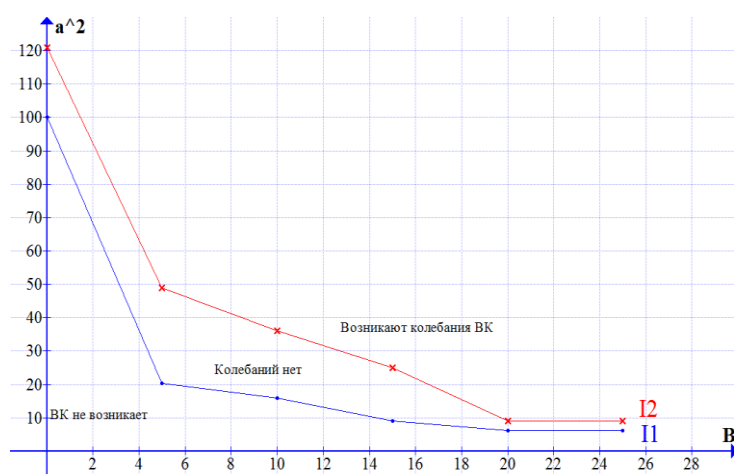
Обнаружено образование вторичного потенциального барьера в пролетном канале, однако, при подборе различных параметрах повторный виртуальный катод получен не был.

Построены карты режимов, демонстрирующие, что инжектируемый ток квадратично зависит от геометрического параметра, однако с увеличением радиуса пучка зависимость нарушается, что связано с оседанием электронов на стенках пролетного канала. А так же получено, что при малых значениях радиуса электронного пучка, с увеличением магнитного поля, критический ток инжекции уменьшается. И при  $B=0$  это разница становится особенно заметна, что объясняется фокусирующими свойствами магнитного поля, которые ускоряют процесс формирования провисания потенциала.

Также было построены карты режимов для электронных пучков с разной кинетической энергией. С увеличением ускоряющего напряжения необходимо увеличивать и ток, поскольку электронам хватает энергии преодолеть минимум потенциала, а следовательно виртуальный катод не образуется.



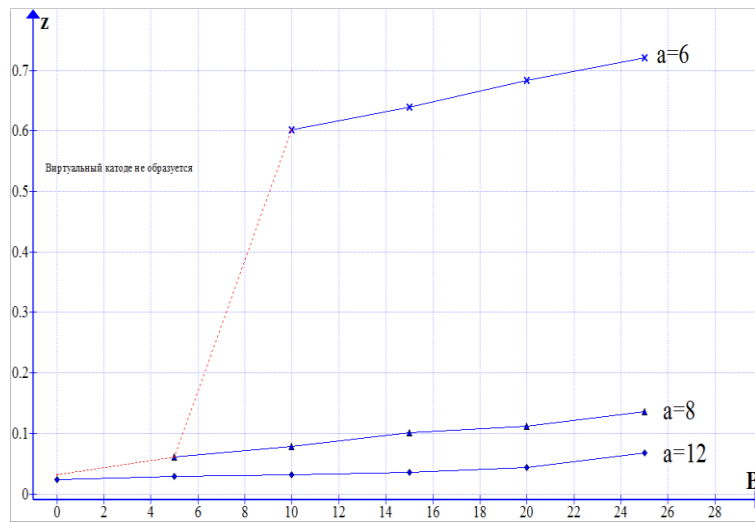
Исследовано поведение первого (возникновения виртуального катода) и второго (возникновения колебаний виртуального катода) электрических токов. Получено, что ток  $I_2$  возникает при больших значениях тока, что объясняется тем, что для возникновения колебаний виртуального катода необходима большая энергия. Однако стоит отметить, что при больших магнитных полях колебания возникают практически при тех же токах, что и виртуальный катод.



Определены границы применения модели и исследовано поведение электронного пучка при больших магнитных полях порядка 0,6Тс. Получены картины пульсации и разрушения виртуального катода. Сделан вывод, что виртуальный катод не образуется в сильном магнитном поле, поскольку электронам не хватает энергии совершить переходный процесс.

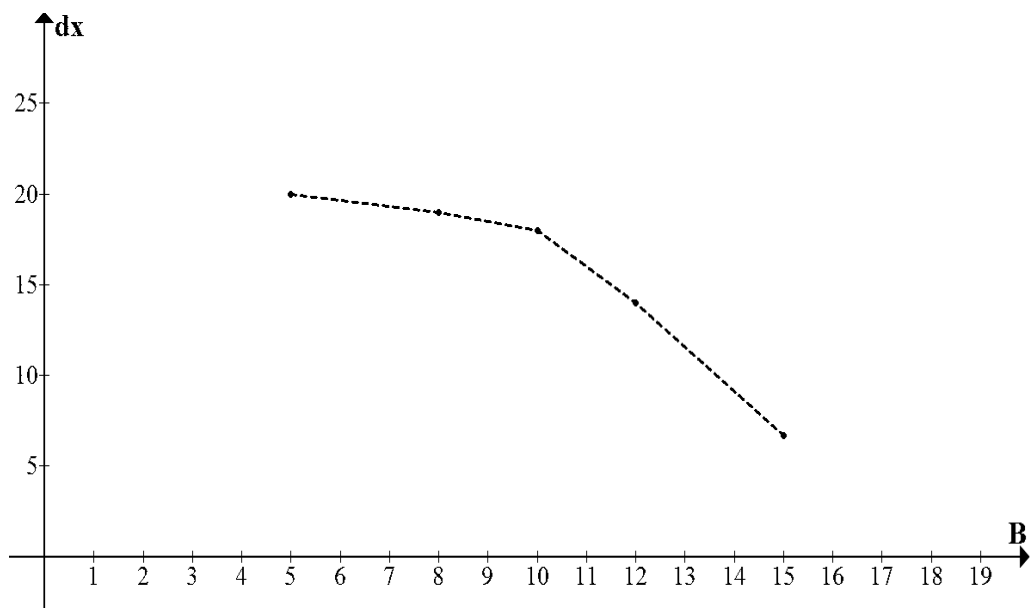
Во второй главе были исследованы параметры виртуального катода. Поскольку виртуальный катод совершает колебания, как во времени, так и в пространстве, были изучены такие его характеристики, как координата минимума потенциала виртуального катода и средняя амплитуда колебаний виртуального катода за период и его ширина .

Обнаружено, что с увеличением магнитного поля координата минимума провисания потенциала монотонно удаляется от плоскости инжектора, что объясняется отрицательным влиянием магнитного поля на изменение траектории электронов.



Так же получено, что с ростом плотности тока инжекции координата минимума виртуального катода также стремится к реальному катоду из-за увеличения сил пространственного заряда.

Была построена зависимость ширины виртуального катода при увеличении магнитного поля при фиксированных параметрах в не динамическом режиме, то есть в режиме, где не возникают устойчивые и явные колебания электрического поля. Обнаружено образование вторичного провисания потенциала. Так же наблюдались единичные выбросы, которые могут быть причиной вычислительной ошибки.





## **Заключение.**

В настоящей работе было исследовано воздействие внешнего однородного магнитного поля на характер поведения электронных пучков со значениями критическими и надкритическими токами при различных заданных управляющих параметрах.

Было продемонстрировано, что введение однородного магнитного поля в систему пространства дрейфа виркатора при изменении управляющих параметров приводит к появлению новых режимов динамики электронного пучка. В рамках поставленной задачи, использовалась программа, которая численно моделировала двумерную модель виркатора.

В первой главе были исследованы принципы формирования виртуального катода в пролетном канале. А. Описаны основные физические законы формирующие виртуальный катод. Обнаружены условия формирования виртуального катода, построены карты режимов при разных значениях плотности инжектируемого тока, безразмерного радиуса и ускоряющего напряжения. Приведены физические процессы, которые описывают подобное поведение зависимостей. Построены зависимости первого (соответствующий условию возникновения виртуального катода) и второго (соответствующий условию возникновения колебаний виртуального катода) критического тока при разных значениях магнитного поля, обнаружено, что отношение токов меняется с ростом магнитного поля, что представляет большой интерес для дальнейшего изучения процессов в виртуальном катоде. Обнаружено критическое значение магнитного поля порядка  $B \sim 0,6$  Тс, при котором виртуальный катод не возникает.

Во второй главе получены различные режимы динамики электронного пучка, связанные с его взаимодействием с однородным внешним магнитным полем в соответствии с выбранными управляющими параметрами тока. Поскольку виртуальный катод совершает колебания как во времени, так и в пространстве, а следовательно ведет себя нестационарным образом, были

исследованы средняя координата потенциального минимума виртуального катода за период и ширина виртуального катода. Получено, что с ростом магнитного поля ширина виртуального катода уменьшается. Так же обнаружено образование вторичного провисания потенциала.

Полученные данные и карты режимов могут нести большой практический интерес при использовании электронных потоков с виртуальным катодом для генерации мощного СВЧ-излучения. Это может быть использовано, как для теоретического анализа и изучения еще не понятых явлений в СВЧ-электронике, так и для расчёта и дальнейшего создания эффективных виркаторов.