

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

Кафедра физики открытых систем

Приборы на виртуальном катоде.
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 431 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
Факультета Нелинейных Процессов
Губанова Владислава Андреевича

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

С.А. Куркин

Заведующий кафедрой
Профессор, д.ф.-м.н.

А.А Короновский

Саратов 2016 год

Введение. В последнее время большой интерес представляет исследование приборов, основанных на осцилляциях виртуального катода. Специалисты в области СВЧ электроники всегда стремились к созданию приборов, которые обладают большими выходными мощностями и КПД

Виркаторы интересны тем, что они имеют простую конструкцию, и есть определенные возможности их модификации для повышения КПД и выходной мощности.

В данной выпускной квалификационной работе бакалавра проделана работа, связанная с аналитическим обзором статей и научной литературы, посвященных различным модификациям приборов на виртуальном катоде. Были описаны механизмы генерации в таких приборах.

Структура работы:

Глава 1. Генераторы на виртуальном катоде. Виртуальный катод.

Описан механизм возникновения виртуального катода. Приведено общее понятие виркатора. Рассказана история появления разных модификаций приборов на виртуальном катоде.

Глава 2. Принципы устройства виркатора.

В данной главе рассказано о механизмах генерации в виркаторах.

Глава 3. Обобщающая таблица.

Составлена таблица о приборах на виртуальном катоде, проведено сравнение: выделены плюсы и минусы различных модификаций.

Глава 4. Основные приборы на виртуальном катоде.

Детально рассмотрены основные модификации виркаторов.

Глава 5. Разнообразные новые модификации приборов на виртуальном катоде, представленные в течение последних лет.

В данной главе рассмотрены виркаторы из научной литературы и статей, вышедших за последние 10 лет.

Заключение.

Сделаны выводы.

Основное содержание работы. Генераторы на виртуальном катоде, чаще называемые виркаторы (от английского virtual cathode oscillator) — это новый класс приборов релятивистской электроники, использующий для генерации импульсов сверхмощного СВЧ-излучения колебания виртуального катода в электронном пучке со сверхкритическим током.

К появлению такого класса приборов привело то, что ранее существующие приборы пролетного типа, такие как лампа бегущей волны (ЛБВ), клистроны резко теряли эффективность при приближении тока электронного потока к предельному из-за влияния пространственного заряда пучка.

Виркаторы используют для генерации сверхвысокочастотного излучения энергию собственных полей релятивистских электронных пучков (РЭП) в режиме сверхкритических токов, когда возникает поток электронов, отраженных в сторону катода, и в пучке образуется виртуальный катод.

Данные приборы на виртуальном катоде имеют такие достоинства:

- они имеют простую конструкцию;
- они характеризуются компактностью;
- большая выходная мощность;
- возможна работа без магнитного фокусирующего поля;
- широкая перестройка частоты генерации СВЧ излучения;

-возможность управления прибором внешним сигналом (это свойство является важным при использовании виркаторов в качестве модулей фазированных антенных решёток);

-преобразование энергии электронного потока в энергию СВЧ излучения происходит непосредственно в области его формирования.

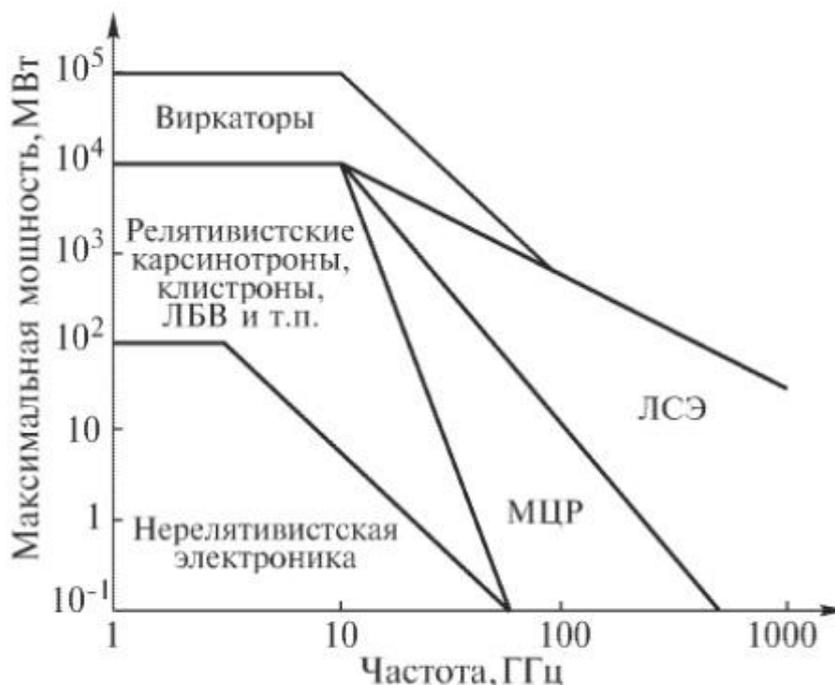


Рис.1: Прогнозируемые диапазоны частот и мощностей, которые смогут достичь различные классы приборов мощной СВЧ-электроники.¹

Исходя из рисунка 1 видно, что виркаторы обладают на данный момент самой большой максимальной выходной мощностью, но она достигается в диапазоне 1-100ГГц, т.е. данные приборы не могут работать в более коротковолновом диапазоне, как МЦР (Мазер на Циклотронном Резонансе) или ЛСЭ (Лазеры на Свободных Электронах). Это многим определяется плотностью тока инжектируемого пучка, значительно повысить которую невозможно.

Еще к недостаткам виркаторов можно еще отнести:

¹ Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков, Т.2,Физмалит 2004г

- малую эффективность преобразования энергии пучка в энергию СВЧ-излучения.

Виркаторы, как и остальные СВЧ приборы, обладают относительно малым КПД. В зависимости от конфигурации устройства КПД колеблется в пределах 1-15%.

Виртуальный катод формируется, когда величина тока I_b влетающего электронного пучка в пространство дрейфа становится выше, чем значение тока пространственного заряда I_{SCL} . При образовании виртуального катода, происходит 2 явления:

1) Область виртуального катода колеблется назад и вперед с плазменной частотой пучка ω_b ;

2) Электроны проходят через виртуальный катод, а часть электронов отражаются обратно к диоду, которые в конечном итоге отражаются от катода обратно к виртуальному катоду. Этот эффект называют отражением. Вообще, колебания виртуального катода по частоте отличаются от колебаний отражения, хотя они могут быть настроены для сопоставления.

Виркатор отличается от других СВЧ источников тем, что микроволновое излучение не генерируется в электронном пучке и резонаторе. Электроны испускаются из катода и ускоряются в направлении катода. Анод виркатора сделан таким образом, чтобы электроны могли проходить сквозь него (рисунок 2). Благодаря такой конструкции за анодом может образоваться виртуальный катод - когда потенциальная энергия пучка электронов больше кинетической. СВЧ излучение генерируется тогда, когда электронное облако (виртуальный катод) колеблется и когда отраженные электроны колеблются между катодом и виртуальным катодом.

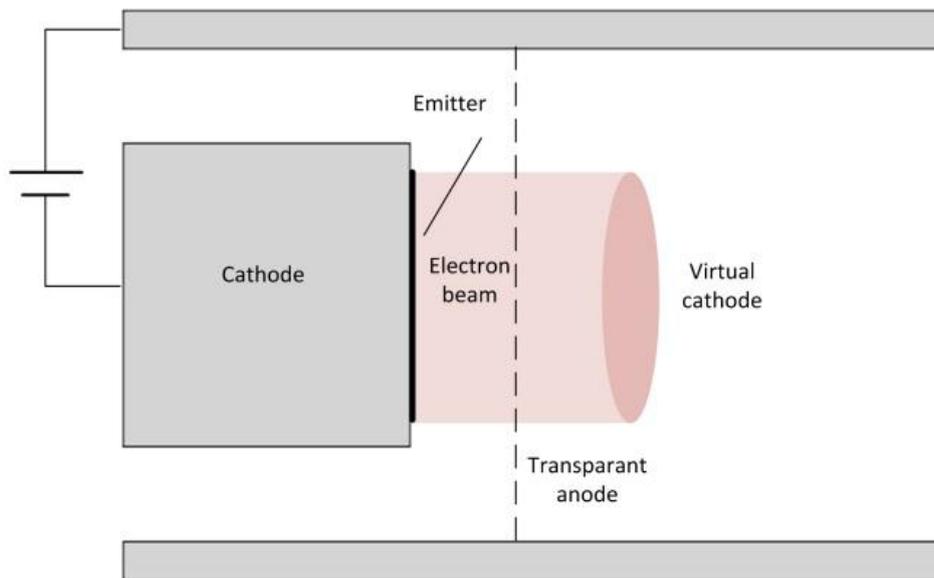


Рис.2: Схематическое изображение виртуального катода. Электроны вылетают с катода и ускоряются в направлении анода, а проходя через сетку анода электроны образуют виртуальный катод при достижении предела пространственного заряда.

Известно множество модификаций приборов на виртуальном катоде. Однако можно выделить 3 более распространенных модификации:

- осевой виркатор;
- коаксиальный виркатор;
- отражательный триод.

Для повышения производительности виркатора виртуальный катод может быть заключен в резонансную полость (в дальнейшем – резонатор). Если резонатор настроен на рабочую частоту, высшие поля могут быть извлечены.

Виркатеры обычно имеют модуляцию частоты в течение импульса, но резонатор может стабилизировать частоту (чтобы не было внутриимпульсной линейной частотной модуляции).

В осевом виркаторе и отражательном триоде резонатор может быть прикреплен коробочкой к аноду, включающий в себя виртуальный катод. В коаксиальном виркаторе катод и анод выступают в роли резонаторов.

В дальнейшем будут приведены приборы с полученными выходными данными.

Генератор на основе двух виртуальных катодов². Созданный генератор мог выдавать две частоты одновременно в диапазоне частот от 600 МГц до 1.2 ГГц. Два СВЧ источника работали параллельно и питались от одного импульсного источника, что было исследовано в работах. Выходная мощность 3 МВт.

Коаксиальный резонаторный виркатор с повышенным КПД³. Экспериментальная система была собрана и испытана. СВЧ излучение было зафиксировано 1,23 ГВт, мощность и КПД соответственно была получена 8,7% и 6,8%.

Влияние длины анода полости на эффективность была зафиксирована. Импульс был укорочен путем введения нового материала и дегазации процесса между анодом и катодом. Измеренная длительность СВЧ импульса 50 нс.

Коаксиальный виркатор с тремя анодами⁴. Данный коаксиальный виркатор был теоретически смоделирован и оптимизирован РИС методом. Была получена частота виркатора 3,8 ГГц, КПД возросла до значения более 20% с стабильной основной частотой, соответствующая модуляции РИС методом и аналитической моделью.

² K. R. Clements, R. D. Curry, R. Druce, W. Carter, M. Kovac. Design and Operation of a Dual Viricator HPM Source. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 4 P. 1085.; August 2013

³ G. Z. Liu, H. Shao, Z. F. Yang, Z. M. Song, C. H. Chen, J. Sun and Y. P. Zhang. Coaxial cavity viricator with enhanced efficiency. J. Plasma Physics (2008), vol. 74, part 2, pp. 233–244.

⁴ H. Shao , G.Z. Liu, Y.P. Zhang, Z.F. Yang, J. Sun and Y.C. Zhang. HPM Generation by Tri-Anode Coaxial Viricator. Acta Physica Polonica A No. 6 Vol. 115, 2009

Виртод (Виркатор с обратной связью).⁵ Устройство выдавало импульс длиной 50 нс., мощностью 1 ГВт, частотой 2 ГГц. При напряжении приблизительно 1 МВ и силой тока 20 кА, КПД прибора достигала 5%. На выходе имелся квази-Гауссовский пучок с распределением в виде TE_{10} волны. Эмиссия ионов в диоде является причиной внутриимпульсной линейной частотной модуляции электронного пучка. Авторы получили действительный КПД приблизительно равной от 8% до 10%.

Виракатор с резонатором.⁶ Виркатор детально исследуется PIC методом. Мы получаем микроволновые частоты для симуляции, теоритических расчетов и сравнивания.

Были представлены три важных вывода:

- Частота постоянна когда диодное напряжение меняется от 588 кВ до 717 кВ.
- Частотный разброс мал, когда значение А-К варьируется от 1,2 см до 1,6 см.
- Микроволновая частота совпадает с теоретическими результатами.

Относительная ошибка, которая была просчитана между теоретическими и полученными практически частотами, составила 1,7%.

При симуляции было получен пик мощности в 1,87 ГВт при частоте 3,695 ГГц, пиковая мощность дала эффективность 14,2%. Значение напряжения – 717 кВ, тока – 18,4 кА.

Характеристика СВЧ излучения в осевом виркаторе.⁷ Представлены характеристические результаты СВЧ излучения, полученные из осевого

⁵ James Benford, John A. Swegle, Edl Schamiloglu. High Power Microwaves, p. 453

⁶ Fan Yu-Wei, Li Zhi-Qiang, Shu Ting, Liu Jing. Efficiency and stability enhancement of a virtual cathode oscillator. Chin. Phys. B Vol. 23, No. 7 (2014)

⁷ Rishi Verma, Rohit Shukla, Surender Kumar Sharma, etc. Characterization of High Power Microwave Radiation by an Axially Extracted Vircator. IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 61, No. 1, January 2014

виркатора путем ввода пучка электронов импульсным ускорителем АМВІСА-600.

Максимальная выходная мощность была достигнута при длине импульса ~ 75 нс, длина А-К промежутка была 7 мм и была получена ~ 14 МВт. Получена основная частота из С-диапазона, $\sim 6,9$ ГГц. Эффективность преобразования энергии пучка в энергию волны составила примерно 1,2%, которое подтверждается другими экспериментами. Сравнительный анализ частотных спектров дает получить набор А-К промежутков, которые будут оптимальны в генераторе с узкополосными частотными пиками в большом магнитном поле с минимальными скачками.

Численное моделирование взаимодействия пучка и резонаторных мод в коаксиальном виркаторе с внутренним излучением.⁸ Основная частота в коаксиальном виркаторе с внутренним излучением решается аналитически при помощи стационарного релятивистского уравнения Максвелла. Полное трехмерное моделирование с помощью РІС метода проходит при использовании TS3 модуля в коде МАFІА.

Были заданы такие параметры. $r_c=7$ см, $r_a=5,5$ см, $V_0=220$ кВ, радиус цилиндрического волновода $r_w=5,5$ см, ток диода 20 кА, длина импульса 20 нс. Ширина области катода – 3 см, расстояние между анодом и катодом 5 см. Рабочая частота – 3 ГГц, выходная мощность 226 МВт.

⁸ J. Benford, J. Swegle, and E. Schamiloglu, High Power Microwaves, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis, 2007.

Заключение. В данной выпускной квалификационной работе бакалавра проделана работа, связанная с рассмотрением статей и научной литературы о различных модификациях приборов на виртуальном катоде.

Генерация в виркаторах происходит благодаря двум основным механизмам: за счет колебаний частиц вокруг анода в промежутке «катод-виртуальный катод» и за счет колебаний виртуального катода как единого целого.

Для достижения более высокой мощности генерации в систему вводятся дополнительные сетки, резонаторы, производится управление внешним магнитным полем а также вводится обратная связь.

Представлена обобщающая таблица, в которой приведено описание модификаций, сравнение между собой.

В некоторых модификациях, таких как осевой виркатор с двумя анодами была получена эффективность порядка 17%, что для виркаторов очень высокий результат. Были достигнуты очень узкие полосы частот, а выходная мощность достигает гигаваттных значений.

В коаксиальном виркаторе с тремя анодами были получены частота 3,8 ГГц, выходная мощность 4,5 ГВт при входной мощности 22 ГВт, КПД более 20%.

Одной из успешных модификаций был редитрон, рассмотренный в статье. Использовался обратный диод. Выходная мощность достигала 1 ГВт, КПД - 28%.