

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКСИАЛЬНОГО ВИРКАТОРА

С.В. АНИЩЕНКО, В.Г. БАРЫШЕВСКИЙ, А.А. ГУРИНОВИЧ, Е.А. ГУРНЕВИЧ,  
П.В. МОЛЧАНОВ, С.Э. СЯГЛО, В.В. ТИХОМИРОВ

*Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета  
ул. Бобруйская 11, г. Минск, 220030, Республика Беларусь  
vvtikh@mail.ru*

Приведены параметры и описана математическая модель аксиального виркатора, разработанного в НИИ ЯП БГУ. Как численные, так и экспериментальные результаты свидетельствуют о высокой мощности и монохроматичности излучения разработанной конструкции.

*Ключевые слова:* виртуальный катод, СВЧ-излучение, метод частица-сетка (PIC-метод).

Одним из наиболее перспективных источников СВЧ импульсов гигаваттных мощностей признан виркатор, в котором для генерации излучения используются колебания виртуального катода (ВК). Сильная нелинейность, нестационарность и многопоточность движения электронов в виркаторах позволяют проводить их разработку только при совместном использовании экспериментальных данных и исходя из первых принципов электродинамики и кинетики, реализованных в методе частица-сетка (particle in cell или PIC-метод) [1–4].

Экспериментальные исследования аксиального виркатора проводились на разработанном и созданном в НИИ ЯП экспериментальном стенде, обеспечивающем следующие параметры: энергия электронного пучка 400–450 кэВ; катоды из пористого графита диаметром 50–70 мм; анодная сетка из нержавеющей стали с геометрической прозрачностью 77 %; катод-анодный зазор 13–16 мм, возможность установки резонатора разной конфигурации.

Также в НИИ ЯП был реализован и протестирован собственный алгоритм моделирования PIC-методом [5], позволяющий вести практическую разработку виркаторов, работающих на аксиально симметричных модах. Использование PIC-метода на практике требует регулярного проведения корректирования и цифровой фильтрации численных решений для полей, плотностей заряда и тока. Как способы, так и методики проведения этих процедур весьма разнообразны и зачастую не имеют строгого математического обоснования. При этом владение полной информацией о процедурах корректирования и сглаживания открывает перед разработчиком широкие возможности оптимизации их проведения и тонкой настройки на конкретную задачу, в том числе и с использованием экспериментальных данных.

Разработанный нами код основывается на решении полных уравнений Максвелла методом перешагивания на сдвинутых на полшага в пространстве и времени прямоугольных сетках в приближении идеальной проводимости ограничивающих поверхностей. При переходах между сеточными и непрерывными значениями полей, плотностей тока и заряда использовалась процедура взвешивания первого порядка. Релятивистское уравнение движения частиц (уравнение Ньютона-Лоренца) решалось методом Бóриса [1]. Возникающее при численном счете нарушение уравнения Гаусса, эквивалентное нарушению уравнения сохранения заряда, корректировалось методом, также предложенным Бóрисом [1]. При этом оказалось, что для решения уравнения Пуассона для корректирующего потенциала достаточно лишь одной итерации методом Якоби на ка-

ждом временном шаге. Для подавления численных коротковолновых шумов от поперечных составляющих полей использовалась нецентральная по времени процедура фильтрации Годфри [6]. Инжекция заряда проводилась в плоскости, отстоящей на четверть шага сетки от эмитирующей поверхности. Величина инжектируемого заряда диктовалась теоремой Гаусса для ячеек, примыкающих к поверхности, и обращением в ноль электрического поля на последней.

Рис. 1 иллюстрирует применение разработанного численного кода к моделированию работы аксиального виркатора, состоящего из плоского диода и резонатора, содержащего три диафрагмы: внутренний диаметр и длина полостей резонатора для первой – 100 и 60 мм, для второй – 100 и 20 мм, для третьей – 130 и 12 мм и для четвертой – 140 и 65 мм, соответственно; мембраны толщиной 5 мм расположены на стыках полостей резонатора и имеют диаметры отверстий 50, 80 и 120 мм, соответственно. Приведенные на рис. 1, *а* теоретические распределения частиц в конфигурационном и фазовом пространствах наглядно демонстрируют пространственно-временные осцилляции плотностей заряда и тока, порождаемые колебаниями виртуального катода. Рис. 1, *б* иллюстрирует высокую монохроматичность и мощность излучения. Расчет проводился для напряжения 450 кВ на диоде, средний ток которого был близок к 17 кА. Проведенные эксперименты продемонстрировали удовлетворительное согласие с результатами расчетов.

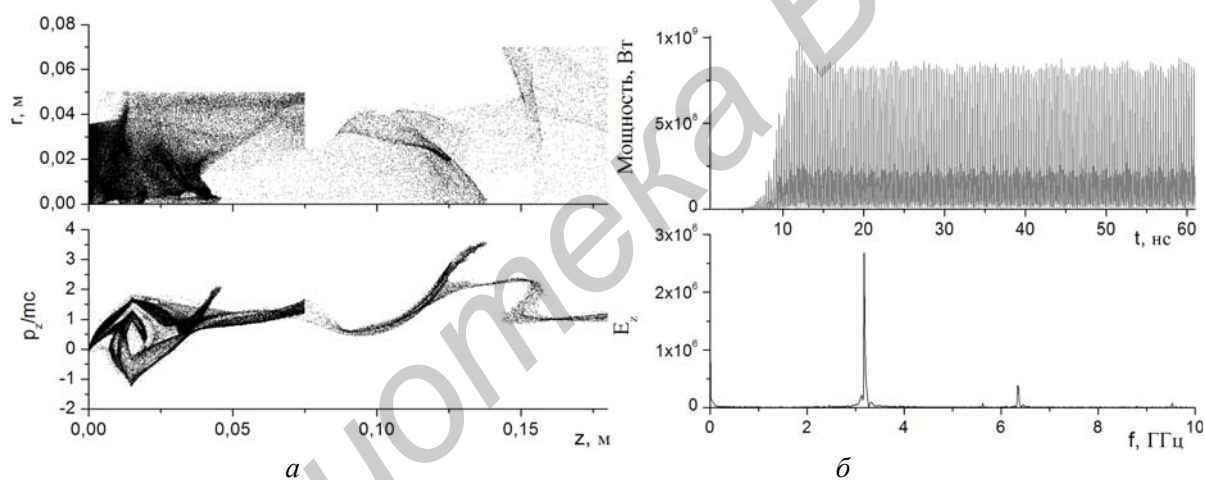


Рис. 1. Конфигурационный (вверху) и продольный фазовый портрет пучка аксиального виркатора (*а*). Временная зависимость мощности (вверху) и спектр излучения (внизу) виркатора (*б*)

#### Список литературы

1. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М., Энергоатомиздат, 1989.
2. Goplen B., Ludeking L., Smithe D., Warren G. // *Comp. Phys. Comm.* 1995. Vol. 87, P. 54–86.
3. Tarakanov V.P. 'User's Manual for Code KARAT'. BRA Inc., Va, USA. 1992.
4. Кураев С.А., Рак А.О., Колосов С.В., и др. // *ЖТФ*. 2014. Т. 84, № 3. С. 8–13.
5. Тихомиров В.В., Сягло С.Э. Моделирование аксиального виркатора. // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. В печати. // *Tikhomirov V.V., Siahlo S.E. Simulation of an axial vircator.* acc-ph/1309.6486.
6. Godfrey B.B., Goplen B. // 22 Annual meeting of APS, Division of plasma physics, 10-14 November, 1980 Mission Res. Corp., Lancaster, PA, AMRC-N-146, Nov. 1980.