

## Формирование потока обратных электронов в процессе генерации мощного импульса микроволнового излучения в многоволновых черенковских устройствах

В. Н. Корниенко,\* В. А. Черепенин

*ИРЭ имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 72*

Методами вычислительного эксперимента исследована динамика электронного пучка в многоволновом черенковском генераторе. Показана возможность образования потока заряженных частиц, движущегося навстречу исходному. Исследованы его основные характеристики.

PACS: 84.40.-x      УДК: 537.5

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, релятивистская силовочная электроника, многоволновой черенковкий генератор.

Известно, что значительное увеличение мощности генерации излучения устройствами, основанными на взаимодействии электромагнитного поля с потоками электронов, возможно получить только при увеличении мощности пучков заряженных частиц [1]. Интенсивные исследования, связанные с возможностью использования для этой цели релятивистских потоков, были начаты во второй половине XX века, образовав в итоге новое направление в радиофизике сверхвысоких частот — релятивистскую высокочастотную электронику (РВЭ) [2]. Одним из приборов РВЭ является многоволновой черенковский генератор (МВЧГ), обладающий уникальными характеристиками [3]. Именно на этом генераторе был получен рекордный уровень мощности импульсного излучения в трехсантиметровом диапазоне длин волн — до 15 ГВт. Одной из особенностей работы МВЧГ при использовании электронного пучка микросекундной длительности с начальной энергией заряженных частиц  $\sim 2$  МэВ и общим током  $\sim 20$  кА является относительно короткий импульс излучения (десятки наносекунд). Возможных причин столь значительной разницы в интервалах времени несколько. В частности, срыв генерации может быть вызван существенным изменением динамики пучка за счет образования потока электронов, движущихся навстречу основному пучку (потока «обратных» электронов). При достижении пиковых значений мощности генерации в МВЧГ одновременно могут выполняться два условия, необходимых для возникновения такого потока: в виду высокого к.п.д. прибора ( $> 30\%$ ) у большей части частиц кинетическая энергия существенно уменьшается; электромагнитное поле внутри генератора достигает значений, при которых за один период колебаний высокочастотного поля над электронами совершается работа, сравнимая с их начальной энергией.

Цель данной работы состояла в выяснении методами вычислительного эксперимента факта наличия потока «обратных» электронов при работе МВЧГ, имеющего параметры, близкие к реализованным в реальном эксперименте, и, если такой поток существует, определе-

ние его основных характеристик.

Рассмотрим следующую электродинамическую структуру (ЭС), в основе которой лежит круглый волновод диаметром 14 см. Условно ЭС разделим на пять частей. Первая и последняя части представляют собой отрезки гладкого круглого волновода. Вторая и четвертая части (секции ЭС МВЧГ) имеют периодически расположенные неоднородности в виде полуторов, радиус которых равен 3 мм. Расстояние между неоднородностями фиксировано и составляет 1.5 см. Первая секция содержит 26 неоднородностей, вторая — 9. Секции ЭС разделены коротким отрезком гладкого волновода (трубой дрейфа) длиной 3.5 см. Кольцевой электронный поток, соосный с ЭС, имеет средний радиус 5.55 см и общий ток 16 кА. Он образован заряженными частицами, начальная энергия которых равна 1.8 МэВ. Длительность переднего фронта пучка не превышает 1 нс. Величина однородного статического магнитного поля, обеспечивающего транспортировку пучка заряженных частиц вдоль ЭС, равна 18 кГс. Его силовые линии параллельны оси симметрии ЭС.

Совместную динамику электромагнитного поля и электронов пучка будем описывать уравнениями Максвелла в пространственно-временном представлении и уравнениями движения электронов. Для решения самосогласованной системы уравнений используем численный алгоритм, описанный в [4].

Проведенное численное моделирование описанной системы показало, что поток обратных электронов зарождается в месте оседания заряженных частиц на стенки ЭС (рис. 1). Время его возникновения соответствует времени старта генерации (рис. 2), т. е. моменту образования достаточно плотных сгустков электронов на выходе второй секции МВЧГ. Количество обратный электронов по отношению к общему количеству частиц незначительно ( $\sim 0.2\%$ ).

С течением времени картина распределения обратных электронов по импульсам и координатам стабилизируется и оказывается близким к кривым 4 рис. 1. Распределение по импульсам достаточно хорошо описывается Гауссовым законом. Концентрация обратных электронов в стационарном режиме имеет максимум в конце первой секции прибора.

\*E-mail: korn@cplire.ru

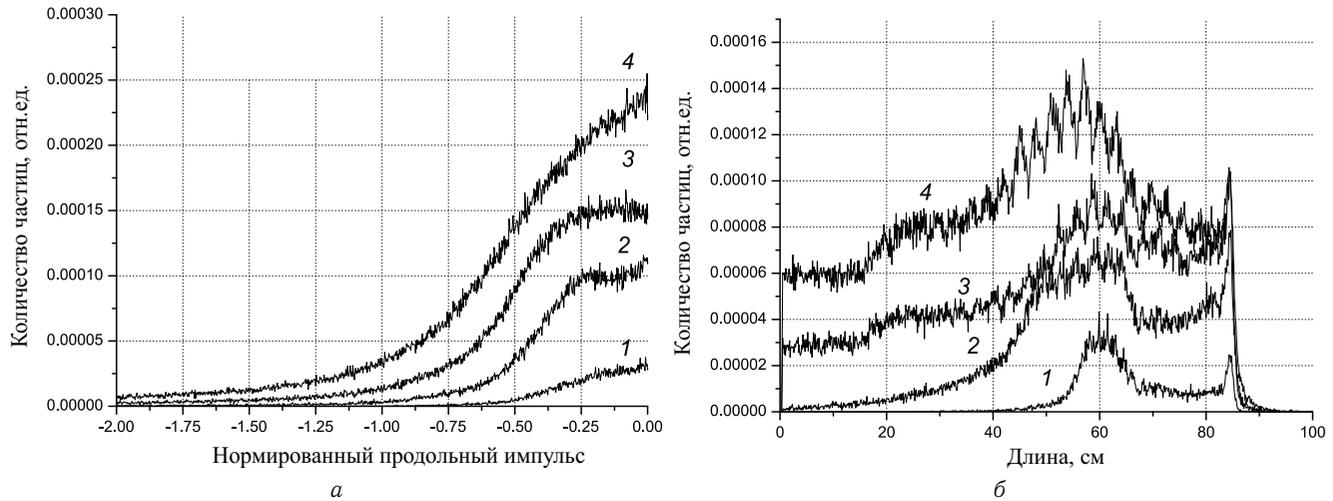


Рис. 1: Распределение «обратных» электронов по импульсам (а) и координатам (б) в моменты времени 30 нс (1), 33 нс (2), 40 нс (3) и 60 нс (4) после влета пучка

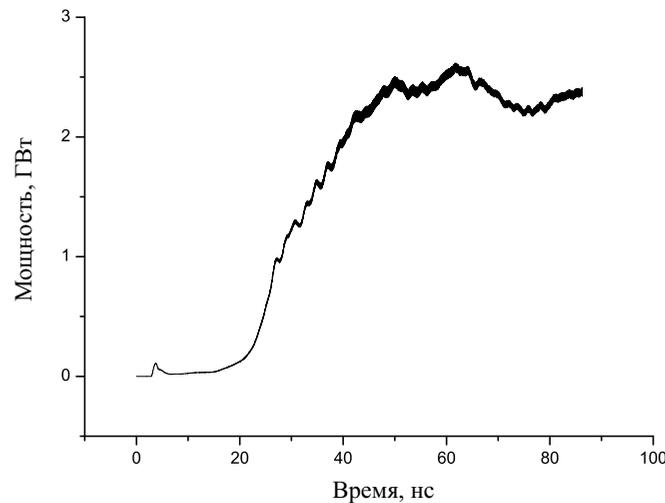


Рис. 2: Зависимость усредненного потока мощности излучения от времени через выходное сечение МВЧГ

Моделирование было проведено на вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерно-

го центра РАН.

- [1] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. Письма в ЖЭТФ. **18**, Вып. 4. С. 232. (1973).  
 [2] Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. Вестник АН СССР. № 4. С. 11. (1979).  
 [3] Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин

- В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука, 1991.  
 [4] Корниенко В.Н., Черепенин В.А. Радиотехника и электроника. **48**, № 6. С. 758. (2003).

## Formation of reverse flow of electrons in the process of generating high-power pulse of microwave radiation in the multi-wavelength Cherenkov devices

V. A. Cherepenin, V. N. Kornienko<sup>a</sup>

Kotelnikov's Institute of Radioengineering and Electronic RAS. Moscow 125009, Russia  
 E-mail: <sup>a</sup>korn@cplire.ru

Methods of computer simulation were used for investigating of the electron beam dynamics in the multi-wave Cherenkov generator. The possibility of the formation of a flow of charged particles moving toward the cathode part of device was demonstrated. Basic characteristics of backward moving electron flow were studied.

PACS: 84.40.-x

Keywords: computer simulation, high power microwave, multi-wave Cherenkov oscillator.

#### **Сведения об авторах**

1. Корниенко Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, зам. директора; тел.: (495) 629-72-79, e-mail: korn@cplire.ru.
2. Черепенин Владимир Алексеевич – чл.-корр. РАН, зав. лабораторией; тел.: (495) 629-72-79, e-mail: cher@cplire.ru.