



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОВОЛНОВОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ГЕНЕРАТОРА*

В. Н. Корниенко, В. А. Черепенин

Методами вычислительного эксперимента проведен анализ влияния величины коэффициента отражения электромагнитного поля от катодного узла на характеристики излучения многоволновых черенковских генераторов. Показано, что оптимальные параметры генерации могут быть достигнуты при значениях коэффициента отражения, близких к единице.

Ключевые слова: Релятивистская высокочастотная электроника, многоволновые черенковские генераторы, численное моделирование.

Введение

С 80-х годов прошлого века началось стремительное развитие нового направления в радиофизике сверхвысоких частот – релятивистской высокочастотной электроники, изучающей возможности преобразования энергии релятивистских электронных потоков большой интенсивности в мощное когерентное электромагнитное излучение [1]. Одной из основных проблем релятивистской высокочастотной электроники является обеспечение достаточной электрической прочности электродинамических структур (ЭС), в которых происходит энергообмен между интенсивным электронным пучком и электромагнитным полем.

Использование сверхразмерных ЭС позволяет при той же самой мощности генерируемого микроволнового излучения существенно снизить напряженность переменного электрического поля вблизи неоднородностей ЭС, уменьшив тем самым вероятность пробоя. В качестве примера устройства, использующего такую ЭС, можно привести многоволновой черенковский генератор (МВЧГ) [2], который был создан в ИСЭ СО РАН совместно с ИРЭ РАН.

*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6–11 февраля 2012.

Уникальные характеристики МВЧГ (рекордный до настоящего времени уровень выходной мощности – порядка 15 ГВт в 3-сантиметровом диапазоне длин волн) связаны с необычным для традиционной электроники характером взаимодействия электронного пучка и электромагнитного поля [3].

Среди множества конструктивных особенностей этого устройства следует отметить следующее: большой диаметр (около 14 см) аксиально-симметричной ЭС, которая состоит из двух секций с относительно малым (0.6 см) размером периодически расположенных неоднородностей, разделенных отрезком гладкого волновода; высокоэнергетический (около 2 МэВ) трубчатый электронный поток, транспортируемый в достаточно большом продольном магнитном поле на расстоянии 0.5...1.5 см от края неоднородностей.

Известно, что в сверхразмерных ЭС одновременно может существовать значительное количество как симметричных, так и несимметричных мод, взаимодействие с электронным пучком которых может приводить к многочастотной генерации со сложной поперечной структурой поля. Однако экспериментальные исследования свойств излучения [4], показали, что генерируемое в МВЧГ электромагнитное поле имеет, в основном, аксиально-симметричный вид, близкий по структуре к модам E_{0n} круглого волновода.

Данная работа посвящена выяснению возможных факторов, влияющих как на мощность, так и на поперечную структуру излучения релятивистских генераторов черенковского типа.

1. Постановка задачи

Рассмотрим следующую модель МВЧГ. Пусть ЭС, близкая по своим параметрам к использованной в экспериментах [5], состоит из двух секций, содержащих периодически расположенные на расстоянии 1.5 см неоднородности в виде полуторов с радиусом 3 мм. Первая секция содержит 16 неоднородностей, вторая – 10. Секции соединяет отрезок гладкого круглого волновода, длина которого сопоставима с длиной второй секции. Аналогичные отрезки круглого волновода располагаются перед первой и после второй секций ЭС. Они заполнены поглотителем толщиной 15 см, степень согласования которого обеспечивает коэффициент отражения на уровне около минус 25 дБ на частоте 10 ГГц (близкой к частоте генерации МВЧГ). В системе существует внешнее однородное магнитное поле, силовые линии которого направлены вдоль ЭС. Величина этого поля лежит в диапазоне от 18 до 21 кГс. Кольцевой электронный пучок, ось которого совпадает с осью структуры, инжектируется с левого конца ЭС, который в дальнейшем будем называть «катодным». Пучок имеет резкий передний фронт. Начальная энергия частиц – около 2 МэВ. Ток пучка – от 15 до 20 кА. Предполагаем, что в области расположения поглотителя на частицы действует только внешнее магнитное поле.

Динамику физических процессов будем описывать системой уравнений Максвелла в пространственно-временном представлении и уравнениями движения заряженных частиц [6]. Предполагая, что диэлектрическая и магнитная проницаемости внутри объема, ограниченного проводящими поверхностями, равны единице, само-

согласованная система уравнений будет иметь следующий вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d\mathbf{P}_i}{dt} = e \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_i \times \mathbf{B}] \right), \quad (5)$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = e \sum_i \mathbf{v}_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), \quad (6)$$

где $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ – напряженности электрического и магнитного поля, соответственно; \mathbf{j} – плотность тока, формируемая движущимися заряженными частицами; c – скорость света; e – заряд электрона; \mathbf{r}_i , \mathbf{v}_i , \mathbf{P}_i – радиус-вектор, скорость и импульс i -й частицы.

Предполагая, что ЭС представляет собой идеальный проводник, положим тангенциальную компоненту электрического поля на границе ЭС равной нулю. Пусть в начальный момент времени электромагнитное поле и заряженные частицы в системе отсутствуют

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, 0) = 0, \quad \mathbf{H}(\mathbf{r}, 0) = 0, \quad \mathbf{j}(\mathbf{r}, 0) = 0. \quad (7)$$

Для решение системы (1)–(6) с выбранными начальными и граничными условиями использовали трехмерный численный алгоритм, близкий к описанному в [7]. Отметим, что в этом алгоритме уравнения (3), (4) используются только для контроля точности решения. Непрерывные частные производные в (1), (2) были аппроксимированы конечными разностями [8]. Моделирование электронного пучка выполняли методом крупных частиц [9].

В качестве контролируемых величин были выбраны поток мощности микроволнового излучения через поперечное сечение, расположенное после второй секции ЭС, и пространственно-временное распределение продольных компонент напряженностей электрического и магнитного полей в том же сечении. Получаемые в процессе моделирования значения контролируемых величин записывались в файл длительного хранения для последующей обработки.

Пространственно-временное распределение полей было использовано для проведения анализа модового состава генерируемого излучения, который проводился по следующему алгоритму. После окончания моделирования, используя преобразование Фурье временной реализации потока мощности, определяли частоту генерации. Для каждой точки поперечного сечения вычисляли значение компонент амплитудного и фазового спектров электромагнитного поля на частоте генерации. Полученное пространственное распределение спектральных компонент разлагали по модам круглого волновода [10], радиус которого совпадает с радиусом выходного сечения ЭС. Соотношение амплитуд мод с различными радиальными и азимутальными индексами позволяет судить о качестве симметрии генерируемого излучения.

2. Результаты моделирования

Численное моделирование было выполнено для двух вариантов, различающихся только коэффициентом отражения от «катодного» конца ЭС.

Вначале рассмотрим случай, когда «катодный» конец ЭС содержит согласованный поглотитель. В течение первых 60 нс после старта пучка в системе развивается генерация, средняя мощность которой в стационарном режиме достигает уровня 2 ГВт (рис. 1), что соответствует электронному КПД $\approx 7\%$. Частота генерации оказалась равной 9.8 ГГц.

Проведенный анализ показал, что генерируемое поле содержит, в основном, несимметричные моды с азимутальным индексом 6. При этом моды E_{61} , E_{62} и E_{63} имеют амплитуду, существенно превосходящую амплитуду остальных мод.

Таким образом, при низком коэффициенте отражения электромагнитного поля от «катодного» конца ЭС уровень мощности и структура поля генерации существенно отличаются от наблюдаемых в эксперименте [4].

Во втором варианте численного моделирования поглотитель был заменен металлической стенкой. На рис. 2 приведены характеристики выходного излучения МВЧГ, соответствующие этому случаю. Отметим, что время достижения максимального значения мгновенной мощности P , которое превысило 10 ГВт, сократилось

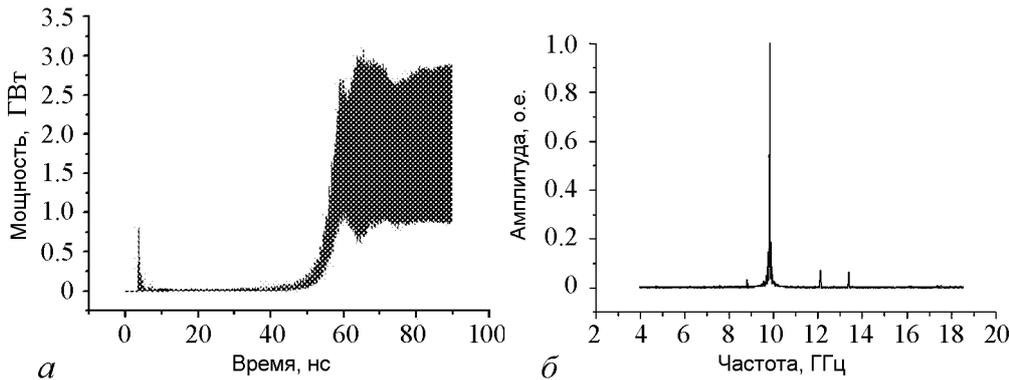


Рис. 1. Зависимость мгновенного потока мощности от времени (а) и спектр выходного излучения (б) в случае хорошего согласования «катодного» конца ЭС

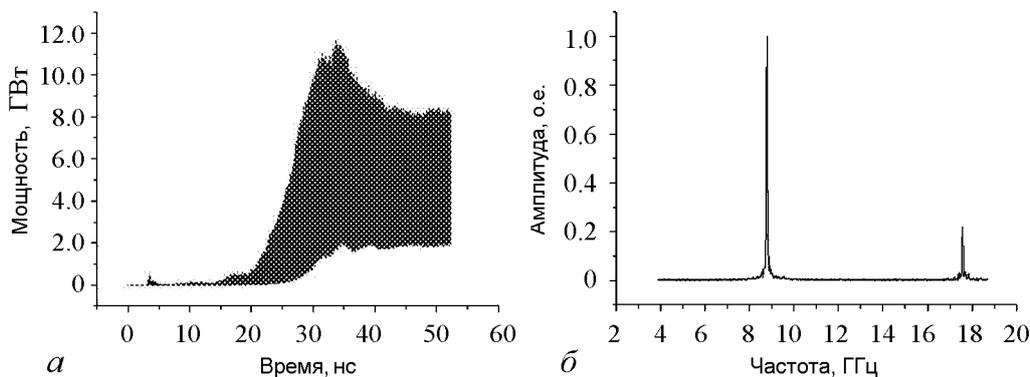


Рис. 2. Зависимость мгновенного потока мощности от времени (а) и спектр выходного излучения (б) в случае, когда коэффициент отражения от «катодного» конца ЭС близок к единице

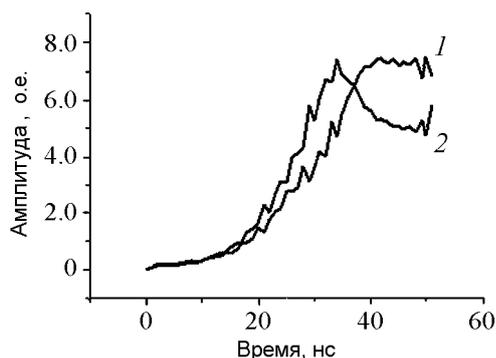


Рис. 3. Амплитуды мод E_{01} (кривая 1) и E_{02} (кривая 2)

описывается модами E_{0n} круглого волновода. Преобладающими оказались моды E_{01} и E_{02} , временная зависимость амплитуд которых представлена на рис. 3.

Таким образом, характеристики поля излучения МВЧГ существенно изменяются при приближении к единице значения коэффициента отражения от «катодного» конца ЭС и становятся близкими к полученным в реальном эксперименте.

Выводы

Проведенное численное моделирование показало, что режим работы многоволнового черенковского генератора существенно зависит от условий согласования для электромагнитного поля в области катодного узла. Изменяя эффективный коэффициент отражения (например, путем установки перед первой секцией электродинамической системы втулок, выполненных из поглощающего материала), можно изменять как выходную мощность, так и поперечную структуру генерируемого излучения.

Библиографический список

1. Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. Релятивистская высокочастотная электроника // Вестник АН СССР. 1979. № 4. С. 11.
2. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И. и др. Релятивистский многоволновой черенковский генератор // Письма в журн. тех. физики. 1983. Т. 9. Вып. 22. С. 1385.
3. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск, «Наука», 1991 г.
4. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Кошелев В.И. Атмосферный СВЧ-разряд и исследование когерентности излучения релятивистского многоволнового черенковского генератора // Докл. АН СССР. 1988. Т. 298. № 1. С. 92.
5. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И. и др. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения релятивистскими сильноточными пучками электронов микросекундной длительности // Докл. АН СССР. 1984. Т. 276. № 5. С. 1102.
6. Мешков И.Н., Чириков Б.В. Электромагнитное поле. Часть I. Новосибирск: «Наука», 1987.

до 30 нс. В огибающей временной зависимости P наблюдается четкий пик длительностью около 10 нс (рис. 2, а). Средняя мощность в этом пике составляет приблизительно 7 ГВт (электронный КПД $\approx 23\%$). В спектре генерации доминирует гармоника на частоте 8.8 ГГц. Излучение на удвоенной частоте имеет в 5 раз меньшую амплитуду (рис. 2, б).

В рассматриваемом случае поперечная структура генерируемого поля имеет аксиально-симметричный вид и

7. Бэдсел Ч., Ленгтон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Атом-энергоиздат, 1989.
8. Taflov A. Computational Electrodynamics. The Finite-Difference Time-Domain Method. London: Artech House, 1995.
9. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987.
10. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. М.: Атомиздат, 1980.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
Москва

Поступила в редакцию 29.04.2012

FEATURES OF TIME-SPATIAL STRUCTURE FORMATION OF THE MULTIWAVE CHERENKOV-OSCILLATOR RADIATION

V. N. Kornienko, V. A. Cherepenin

The analysis of influence of the reflection coefficient of the electromagnetic field from the cathode on the radiation characteristics of Cherenkov generators was carried out by the methods of computer simulation. It is shown that the optimal parameters of generation can be achieved at the values of the reflection coefficient close to unity.

Keywords: High power microwave, multiwave Cherenkov's oscillators, computer simulation.



Корниенко Владимир Николаевич – родился в селе Балки Запорожской области (1966). С момента окончания физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (1989) работает в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Защитил кандидатскую диссертацию в области компьютерного моделирования физических процессов в устройствах релятивистской высокочастотной электроники (1996).

125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: korn@cplire.ru



Черепенин Владимир Алексеевич – родился в Москве (1947). После окончания в 1971 году физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова работал там же, на кафедре радиофизики сверхвысоких частот, где и защитил (1979) кандидатскую диссертацию. С 1981 года работает в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. В 1989 году защитил докторскую диссертацию в области релятивистской высокочастотной электроники. Член редколлегии журналов «Радиотехника и электроника», «Электромагнитные волны и электронные системы», «Нелинейный мир». Член научного совета РАН по релятивистской и сильноточной электронике, а также научного совета РАН по распространению радиоволн. С 2012 года – член-корреспондент Российской академии наук.

125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: cher@cplire.ru